

# Metoda separacije pogreške vođenja u mjeriteljstvu duljine

---

**Baričević, Jakov**

**Master's thesis / Diplomski rad**

**2019**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Zagreb, Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:037330>

*Rights / Prava:* [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-03-03**

*Repository / Repozitorij:*

[Repository of Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# **DIPLOMSKI RAD**

**Jakov Baričević**

Zagreb, 2019.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# DIPLOMSKI RAD

Mentor:

Doc. dr. sc. Marko Katić, dipl. ing.

Student:

Jakov Baričević

Zagreb, 2019.

*Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći znanja stečena tijekom studija i navedenu literaturu.*

*Želim se zahvaliti svom mentoru doc. dr. sc. Marku Katiću na vremenu, strpljenju, te stručnim savjetima s kojima mi je olakšao izradu diplomskog rada. Također zahvaljujem se doc. dr. sc. Vedranu Šimunoviću, Josipu Smoljić ing. i Tomislavu Habeku ing. na korisnim informacijama i pruženoj pomoći.*

*Najviše se želim zahvaliti svojim roditeljima Damiru i Bibijani što su mi omogućili i bili najveća podrška kroz moje čitavo obrazovanje. Zahvaljujem se sestrama Luciji i Marti, te djevojci Ivani na potpori, razgovoru i strpljenju tijekom studija.*

*Jakov Baričević*



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
**FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE**



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite  
Povjerenstvo za diplomske radove studija strojarstva za smjerove:  
proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment,  
inženjerstvo materijala te mehatronika i robotika

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum:	Prilog:
Klasa:	
Ur. broj:	

## DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **JAKOV BARIČEVIĆ** Mat. br.: 0035198471

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Metode separacije pogreške vođenja u mjeriteljstvu duljine**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Error separation methods in length metrology**

Opis zadatka:

U okviru ovog zadatka potrebno je demonstrirati metode separacije pogreške vođenja mjernih elemenata od odstupanja oblika predmeta umjeravanja. Navedene metode potrebno je primijeniti na uređaje dostupne u Laboratoriju za precizna mjerenja dužina FSB-a.

Radom je potrebno obraditi sljedeće cjeline:


1. Opisati tolerancije oblika i položaja.
2. Provesti mjerenja odstupanja od pravocrtности na 2D mjernom sustavu, trokoordinatnom mjernom uređaju i alatnom mikroskopu, te mjerenja odstupanja od kružnosti na uređaju za mjerenje kružnosti.
3. Provesti separaciju pogreške vođenja od odstupanja pravocrtности / kružnosti na mjerenjima iz točke 2.
4. Zaključak.

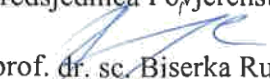
U radu je potrebno navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:  
07. ožujka 2019.

Rok predaje rada:  
09. svibnja 2019.

Predvideni datum obrane:  
15. svibnja 2019.  
16. svibnja 2019.  
17. svibnja 2019.

Zadatak zadao:  
  
doc. dr. sc. Marko Katić

Predsjednica Povjerenstva:  
  
prof. dr. sc. Biserka Runje

## SADRŽAJ

SADRŽAJ .....	I
POPIS SLIKA .....	III
POPIS TABLICA.....	VI
POPIS OZNAKA .....	VII
SAŽETAK.....	VIII
SUMMARY .....	IX
1. UVOD.....	1
2. MJERITELJSTVO .....	3
2.1. Povijest mjeriteljstva.....	3
2.2. Osnovni pojmovi mjeriteljstva.....	3
2.3. Etalon, umjeravanje i sljedivost .....	5
2.4. Pogreške mjernog sustava.....	8
2.4.1. Sustavne pogreške.....	8
2.4.2. Slučajne pogreške .....	9
2.4.3. Grube pogreške .....	11
3. ODSUPANJE OD PRAVOCRTNOSTI I KRUŽNOSTI.....	12
3.1. Pravocrtnost .....	13
3.1.1. Metode mjerenja odstupanja od pravocrtnosti .....	13
3.2. Kružnost.....	14
3.2.1. Metode ispitivanja odstupanja od kružnosti .....	16
4. METODE MJERENJA ODSUPANJA OD PRAVOCRTNOSTI I KRUŽNOSTI.....	17
4.1. Reverzibilna metoda separacije pogreške .....	17
4.1.1. Metoda najmanjih kvadrata.....	18
4.1.2. Pogreška pravocrtnosti i pogreška vođenja.....	20
4.1.3. Ponovljivost .....	22
4.2. Induktivno ticalo .....	23
4.2.1. LVDT senzor .....	23
4.3. Trokordinatni mjerni uređaj .....	25
4.4. Interferometar.....	28
4.4.1. Osnovni princip rada interferometra .....	29
4.5. Autokolimator .....	30
4.5.1. Princip rada autokolimatora .....	30
4.6. Alatni mikroskop.....	31
4.7. Mjerenje odstupanja od kružnosti .....	32
5. REZULTATI MJERENJA .....	34
5.1. Stabilnost induktivnog ticala.....	34
5.1.1. Stabilnost ticala na fleksibilnom magnetnom držaču .....	35
5.1.1.1. Rezultati mjerenja na fleksibilnom magnetnom držaču.....	35
5.1.2. Stabilnost ticala na krutom držaču .....	36
5.1.2.1. Rezultati mjerenja na krutom držaču .....	37

5.2.	Mjerenje odstupanja od pravocrtnosti reverzibilnom metodom separacije pogreške na fleksibilnom magnetnom držaču.....	39
5.2.1.	Rezultati mjerenja .....	40
5.3.	Mjerenje odstupanja od pravocrtnosti reverzibilnom metodom separacije pogreške na krutom držaču .....	49
5.3.1.	Mjerenje i rezultati mjerenja .....	50
5.4.	Mjerenje odstupanja od pravocrtnosti reverzibilnom metodom separacije pogreške na krutom držaču s laserskim pozicioniranjem .....	58
5.5.	Usporedba rezultat mjerenja fleksibilnog magnetnog držača, krutog držača i krutog držača s laserskim pozicioniranjem .....	67
5.6.	Mjerenje odstupanja od pravocrtnosti reverzibilnom metodom separacije pogreške na trokoordinatnom mjernom uređaju .....	70
5.6.1.	Rezultati mjerenja .....	72
5.6.2.	Usporedba rezultata mjerenja .....	77
5.7.	Mjerenje odstupanja od pravocrtnosti reverzibilnom metodom separacije pogreške na alatnom mikroskopu.....	78
5.7.1.	Rezultati mjerenja .....	80
5.8.	Mjerenje odstupanja od kružnosti .....	90
5.8.1.	Rezultati mjerenja .....	93
5.8.2.	Rezultati mjerenja odstupanja od kružnosti etalonske polukugle.....	97
6.	ZAKLJUČAK.....	104
	LITERATURA.....	106
	PRILOZI.....	108

## POPIS SLIKA

Slika 1. Mjerne metode diplomskog rada.....	2
Slika 2. Mjerni postupak [6].....	5
Slika 3. Shema umjeravanja [6] .....	6
Slika 4. Lanac sljedivosti [5].....	7
Slika 5. Abbeov princip mjerenja [5] .....	9
Slika 6. Točnost i preciznost [5].....	11
Slika 7. Preciznost u uvjetima ponovljivosti i obnovljivosti [5] .....	11
Slika 8. Simboli tolerancija oblika, tolerancija položaja i složenih tolerancija [5].....	12
Slika 9. Odstupanje od pravocrtosti [5].....	13
Slika 10. Primjer tolerancije pravocrtosti [8] .....	13
Slika 11. Odstupanje od kružnosti [5].....	14
Slika 12. Primjer tolerancije kružnosti [10] .....	15
Slika 13. Najčešće pogreške kružnosti [5] .....	15
Slika 14. Set podataka mjerenja .....	18
Slika 15. Regresijski pravac metode najmanjih kvadrata .....	19
Slika 16. Prikaz pogreške vođenja i pogreške pravocrtosti.....	20
Slika 17. Shema reverzibilne metoda separacije pogreške [12].....	21
Slika 18. Graf normalne razdiobe [14].....	22
Slika 19. Induktivno ticalo .....	23
Slika 20. Komponente LVDT senzora [18] .....	24
Slika 21. Izlazni signal u ovisnosti položaja jezgre LVDT senzora [18].....	25
Slika 22. Trokordinatni mjerni uređaj .....	26
Slika 23. Mosna, konzolna, stupna, portalna i horizontalna konstrukcija [18] .....	27
Slika 24. Dijelovi trokordinatnog mjernog uređaja [19].....	27
Slika 25. Mehanička ticala [21].....	28
Slika 26. Interferometar.....	29
Slika 27. Autokolimator .....	30
Slika 28. Alatni mikroskop.....	31
Slika 29. Sustav Mahr MMQ 3 .....	32
Slika 30. Fleksibilni magnetni držač i kruti držač.....	34
Slika 31. Pomak pozicije ticala na fleksibilnom magnetnom držaču.....	36
Slika 32. Senzor temperature na krutom držaču .....	37
Slika 33. Pomak pozicije ticala na krutom držaču .....	37
Slika 34. Promjena temperature na krutom držaču .....	39
Slika 35. Mjerni sustav s fleksibilnim magnetnim držačem .....	40
Slika 36. Orijehtacije fleksibilne magnetnog držača, početna orijentacija (lijevo) i reverzna orijentacija (desno) .....	41
Slika 37. Odstupanje od pravocrtosti - početna orijentacija 1. mjerenje.....	42
Slika 38. Odstupanje od pravocrtosti - početna orijentacija, korigirana nesuosnost, prosječna vrijednost .....	43
Slika 39. Odstupanje od pravocrtosti - reverzna orijentacija, 1. mjerenje .....	45
Slika 40. Odstupanje od pravocrtosti - reverzna orijentacija, korigirana nesuosnost, prosječna vrijednost.....	46
Slika 41. Separirano odstupanje od pravocrtosti vodilice .....	48
Slika 42. Separirano odstupanje od pravocrtosti granitnog lineala .....	48



Slika 43. Mjerni sustav s krutim držačem .....	49
Slika 44. Orijehtacije krutog držača, početna orijentacija (lijevo) i reverzna orijentacija (desno) .....	51
Slika 45. Odstupanje od pravocrtnosti - početna orijentacija 1. mjerenje.....	51
Slika 46. Odstupanje od pravocrtnosti - početna orijentacija, korigirana nesuosnost prosječna vrijednost .....	52
Slika 47. Odstupanje od pravocrtnosti - reverzna orijentacija, 1. mjerenje .....	54
Slika 48. Odstupanje od pravocrtnosti - reverzna orijentacija, korigirana nesuosnost, prosječna vrijednost .....	55
Slika 49. Separirano odstupanje od pravocrtnosti vodilice .....	57
Slika 50. Separirano odstupanje od pravocrtnosti granitnog lineala .....	57
Slika 51. Sustav krutog držača s laserskim pozicioniranjem .....	58
Slika 52. Odstupanje od pravocrtnosti - početna orijentacija 1. mjerenje.....	60
Slika 53. Odstupanje od pravocrtnosti - početna orijentacija, korigirana nesuosnost prosječna vrijednost .....	61
Slika 54. Odstupanje od pravocrtnosti - reverzna orijentacija 1. mjerenje .....	63
Slika 55. Odstupanje od pravocrtnosti - reverzna orijentacija, korigirana nesuosnost prosječna vrijednost .....	64
Slika 56. Primjer ishodišne točke laserskog interferometra .....	65
Slika 57. Separirano odstupanje od pravocrtnosti vodilice .....	66
Slika 58. Separirano odstupanje od pravocrtnosti granitnog lineala .....	67
Slika 59. Usporedba separiranog odstupanja od pravocrtnosti vodilice tri mjerne metode .....	68
Slika 60. Usporedba odstupanja od pravocrtnosti tri mjerne metode .....	69
Slika 61. Mjerenje na trokordinatnom mjernom uređaju .....	70
Slika 62. Program „Modus“ trokordinatnog mjernog uređaja .....	71
Slika 63. Definiranje kordinatnog sustava mjernog predmeta .....	72
Slika 64. Separirano odstupanje od pravocrtnosti vodilice 0-400 mm .....	74
Slika 65. Separirano odstupanje od pravocrtnosti lineala 0-400 mm .....	74
Slika 66. Separirano odstupanje od pravocrtnosti vodilice 400-800 mm .....	76
Slika 67. Separirano odstupanje od pravocrtnosti lineala 400-800 mm .....	76
Slika 68. Usporedba separiranog odstupanja od pravocrtnosti vodilice dvije mjerne metode .....	77
Slika 69. Usporedba separiranog odstupanja od pravocrtnosti granitnog lineala dvije mjerne metode .....	78
Slika 70. Prikaz dijelova alatnog mikroskopa .....	79
Slika 71. Metalni lineal .....	79
Slika 72. Orijehtacije metalnog lineala .....	81
Slika 73. Odstupanje od pravocrtnosti - početna orijentacija 1. mjerenje.....	82
Slika 74. Odstupanje od pravocrtnosti - početna orijentacija, korigirana nesuosnost prosječna vrijednost .....	83
Slika 75. Računalni program MerOpt .....	84
Slika 76. Odstupanje od pravocrtnosti - reverzna orijentacija, 1. mjerenje .....	86
Slika 77. Odstupanje od pravocrtnosti - reverzna orijentacija, korigirana nesuosnost prosječna vrijednost .....	87
Slika 78. Separirano odstupanje od pravocrtnosti vodilice .....	89
Slika 79. Separirano odstupanje od pravocrtnosti metalnog lineala .....	89
Slika 80. Primjer idealnog centriranja (A) i lošeg centriranja (B) .....	90
Slika 81. Predmeta mjerenja s eliptičnim odstupanjem od kružnosti .....	91
Slika 82. Sustav za mjerenje odstupanja od kružnosti .....	92
Slika 83. Odstupanje od kružnosti - početna orijentacija, 1. mjerenje.....	93
Slika 84. Odstupanje od kružnosti - početna orijentacija, prosječna vrijednost .....	94

Slika 85. Usporedba početne i reverzne orijentacije mjerenja odstupanja od kružnosti.....	95
Slika 86. Odstupanje od kružnosti- reverzna orijentacija, 1. mjerenje .....	95
Slika 87. Odstupanje od kružnosti - reverzna orijentacija, prosječna vrijednost .....	96
Slika 88 Separirana pogreška rotacije .....	96
Slika 89. Separirano odstupanje od kružnosti .....	97
Slika 90. Sustav mjerenja odstupanja od kružnosti etalonske polukugle.....	98
Slika 91. Odstupanje od kružnosti - početna orijentacija, 1. mjerenje.....	98
Slika 92. Odstupanje od kružnosti - početna orijentacija, prosječna vrijednost .....	99
Slika 93. Odstupanje od kružnosti - reverzna orijentacija, 1. mjerenje .....	99
Slika 94. Odstupanje od kružnosti - reverzna orijentacija, prosječna vrijednost .....	100
Slika 95. Separirana pogreška rotacije .....	100
Slika 96. Separirano odstupanje od kružnosti .....	101
Slika 97. Odstupanje od kružnosti - početna orijentacija, 1. mjerenje.....	102
Slika 98. Odstupanje od kružnosti - reverzna orijentacija, 1. mjerenje .....	102
Slika 99. Separirano pogreška rotacije .....	103
Slika 100. Separirano odstupanje od kružnosti .....	103

## POPIS TABLICA

Tablica 1. Stabilnost ticala na fleksibilnom magnetnom držaču.....	35
Tablica 2 Stabilnost ticala na krutom držaču .....	38
Tablica 3. Mjerenje fleksibilnim magnetnim držačem.....	41
Tablica 4. Nagib pravca i odsječak pravca za mjerenja fleksibilnim magnetnim držačem .....	42
Tablica 5. Metoda najmanjih kvadrata za mjerenja fleksibilnim magnetnim držačem .....	43
Tablica 6. Reverzno mjerenje fleksibilnim magnetnim držačem.....	44
Tablica 7. Nagib pravca i odsječak pravca za reverzno mjerenje fleksibilnim magnetnim držačem .....	45
Tablica 8. Metoda najmanjih kvadrata za reverzno mjerenja fleksibilnim magnetnim držačem .....	46
Tablica 9. Pogreške vođenja i odstupanja od pravocrtnosti granitnog lineala reverzibilnom metodom separacije pogreške s fleksibilnim magnetnim držačem .....	47
Tablica 10. Mjerenja krutim držačem .....	50
Tablica 11. Nagib pravca i odsječak pravca za mjerenje krutim držačem .....	50
Tablica 12. Metoda najmanjih kvadrata za mjerenja krutim držačem .....	52
Tablica 13. Reverzna mjerenja krutim držačem.....	53
Tablica 14. Nagib pravca i odsječak pravca za reverzno mjerenje krutim držačem .....	54
Tablica 15. Metoda najmanjih kvadrata za mjerenja krutim držačem .....	55
Tablica 16. Pogreške vođenja i odstupanja od pravocrtnosti granitnog lineala reverzibilnom metodom separacije pogreške s krutim držačem.....	56
Tablica 17. Mjerenja laserskim pozicioniranjem na krutom držaču .....	59
Tablica 18. Nagib pravca i odsječak pravca za mjerenje s laserskim pozicioniranjem na .....	60
Tablica 19. Metoda najmanjih kvadrata za mjerenja laserskim pozicioniranjem na .....	61
Tablica 20. Reverzno mjerenja laserskim pozicioniranjem na krutom držaču .....	62
Tablica 21. Nagib pravca i odsječak pravca za reverzno mjerenje s laserskim pozicioniranjem na krutom držaču .....	63
Tablica 22. Metoda najmanjih kvadrata za mjerenja laserskim pozicioniranjem na .....	64
Tablica 23. Pogreške vođenja i odstupanja od pravocrtnosti granitnog lineala reverzibilnom metodom separacije pogreške s laserskim pozicioniranjem na krutom držaču.....	66
Tablica 24. Pogreške vođenja i odstupanja od pravocrtnosti granitnog lineala reverzibilnom metodom separacije pogreške na trokordinatnom mjernom uređaju 0-400 mm... 73	
Tablica 25. Pogreške vođenja i odstupanja od pravocrtnosti granitnog lineala reverzibilnom metodom separacije pogreške na trokordinatnom mjernom uređaju 400-800 mm75	
Tablica 26. Mjerenje alatnim mikroskopom .....	80
Tablica 27. Nagib pravca i odsječak pravca za mjerenje krutim držačem .....	81
Tablica 28. Metoda najmanjih kvadrata za mjerenja na alatnom mikroskopu.....	82
Tablica 29. Mjerenje alatnim mikroskopom u reverznoj orijentaciji.....	85
Tablica 30. Nagib pravca i odsječak pravca za mjerenje krutim držačem .....	86
Tablica 31. Metoda najmanjih kvadrata za reverznu orijentaciju na alatnom mikroskopu .....	86
Tablica 32. Pogreške vođenja i odstupanja od pravocrtnosti metalnog lineala reverzibilnom metodom separacije pogreške na alatnom mikroskopu.....	88

## POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
$G(x)$	$\mu\text{m}$	Separirano odstupanje od pravocrtnosti vodilice
$I_1(x)$	$\mu\text{m}$	Rezultat mjerenja
$I_2(x)$	$\mu\text{m}$	Rezultat mjerenja
$l_m$	$m$	Srednja dužina magnetskih silnica
$L$	$H$	Induktivnost zavojnice
$n$	/	Brojčani omjer mjerne veličine i poznate veličine
$N$	/	Veličina niza
$N_z$	/	Broj zavoja
$O$	$\mu\text{m}$	Odsječak pravca
$P$	$\mu\text{m}$	Mjerna pogreška
$P_m$	$W$	Gubitak snage u jezgri
$R(x)$	$\mu\text{m}$	Separirano odstupanje od pravocrtnosti predmeta mjerenja
$R_m$	$I/H$	Magnetski otpor
$R_\delta$	$I/H$	Magnetski otpor
$R_g$	$I/H$	Magnetski otpor
$S_m$	$m^2$	Površina poprečnog presjeka
$S_\delta$	$m^2$	Površina poprečnog zazora
$s$	/	Procijenjeno standardno odstupanje
$X$	/	Mjerna veličina
$X_i$	/	Mjerna veličina dobivena mjerenjem
$X_s$	/	Stvarna vrijednost mjerne veličine
$\bar{x}$	/	Aritmetička sredina skupa brojeva $x$
$Y$	/	Odabrana i poznata veličina
$Z_m$	$I/H$	Ukupni magnetski otpor
$\alpha$	$\mu\text{m}$	Nagib pravca
$\delta$	$m$	Širina zazora
$\mu_0$	$N/A^2$	Magnetni permabilitet vakuumu
$\mu_r$	$N/A^2$	Relativni magnetni permabilitet feromagnetika
$\Phi_m$	$W_b$	Magnetni tok

## SAŽETAK

U današnje vrijeme tehnologija ekspanzivno napreduje i nameće visoke zahtjeve koje je teško pratiti. Tako se u industriji pojavljuje sve više strojeva koji zahtijevaju visoku točnost i preciznost pozicioniranja (mjerenja) poput alatnih strojeva, mjernih uređaja, medicinskih uređaja, industrijskih manipulatora. Kako bi oni mogli ostvariti zahtjeve točnosti i preciznosti moraju imati kvalitetno izrađene vodilice. Međutim ni jedna vodilica nije idealna pa tako svaka vodilica sadrži određeno odstupanje od pravocrtosti, a svako odstupanje na vodilici pojavit će se i u konačnom rezultatu. Kako bi se takav problem mogao eliminirati mora se moći izmjeriti pogreška vođenja, a taj problem obradit će se u ovom radu.

U okviru ovog rada pokazat će se primjenjivost metode separacije pogreške na različitim mjernim uređajima za mjerenje odstupanja od pravocrtosti i pogreške vođenja. Uvodnom dijelu rada opisana je tema diplomskog rada sa šireg stajališta. Zatim slijedi kratki osvrt na temeljne pojmove mjeriteljstva. Objasnjene su tolerancije oblika i položaja s naglaskom na tolerancije pravocrtosti i kružnosti te su navedene metode mjerenja odstupanja od pravocrtosti i kružnosti. Detaljno je opisana reverzibilna metoda separacije pogreške, te su prikazani i opisani uređaji za mjerenje pravocrtosti. Kako bi se potvrdila postojanost reverzibilne metode separacije pogreške provedena su mjerenja odstupanja od pravocrtosti u Laboratoriju za precizna mjerenja dužina na Fakultetu strojarstva i brodogradnje na sljedećim uređajima: 2D mjernom sustavu, trokoordinatnom mjernom uređaju i alatnom mikroskopu te mjerenje odstupanja od kružnosti na uređaju za mjerenje kružnosti. Napravljen je usporedba rezultata mjerenja različitih metoda i na kraju je dan zaključak.

Ključne riječi: pravocrtost, kružnost, odstupanja od pravocrtosti, pogreška vođenja, reverzibilna metoda separacije pogreške, metode mjerenja pogreške pravocrtosti.

## **SUMMARY**

Nowadays, the expansion of technology impose high demand that are difficult to follow. In the industry, more and more machines have requires on high accuracy and precision positioning (measuring) as machine tools, measuring devices, medical devices, industrial manipulators. In order to achieve demands of accuracy and precision they must have quality guideways. However every guideway contains some straightness error so any deviation on the guideway will also appear in the final result. In order to eliminate this problem a guideway error must be measured, that problem will be explained in this thesis.

Within this thesis the applicability of error separation method will be shown on different measuring devices to measure straightness error and guideway error.

An introductory part of thesis describes the topic of master work from a broader point of view. A brief overview of the basic terms of metrology follows. The form and orientation tolerances have been explained with emphasis on tolerance of straightness and circularity, also methods of measuring deviations from straightness and circularity have been outlined. A reversal error separation method has been described in detail, also devices for measuring the straightness have been shown and described. To confirm the stability of the reversible error separation method, experimental measurements of the straightness error have been performed in the Laboratory for precise measurement lengths at the Faculty of mechanical engineering and naval architecture on the following devices: 2D measuring system, three coordinate measuring device and tool microscope, and measurement of circularity error on measuring device circularity. A comparison of the measurement results of different methods has been made and a conclusion at the end of the thesis has been presented.

Key words: straightness, circularity, straightness error, guidance error, reversal error separation method, straightness error measurement methods

## 1. UVOD

„Mjeriteljstvo predstavlja naizgled mirnu površinu koja pokriva dubine znanja koja su poznata samo nekolicini, ali koju većina koristi – uvjereni da dijele zajedničko znanje o tome što predstavljaju izrazi kao što je metar, kilogram, vat i sekunda“ [1, str. 10]. Najčešća pomisao većine ljudi kada čuje riječ mjerenje su: mjerenje duljine, mjerenje vremena, mjerenje mase. Ta mjerenja predstavljaju početke razvoja mjeriteljstva, ali i ključne informacije neophodne za razvoj civilizacije. Svaki kompleksan rad zahtjeva poznavanje mjera i posjedovanje mjernih alata, npr. trgovina je nezamisliva bez mjerenja mase, dimenzija, obujma.

U današnje vrijeme neupitno su potrebna točna i precizna mjerenja u svim segmentima. Tehnologija napreduje na dnevnoj bazi, zahtjevi industrije sve su teže ostvarivi i neizbježne su situacije kada poboljšanje proizvoda ograničava mjerni alat koji nema dovoljnu rezoluciju za ostvarivanje željenih ciljeva. Takav problem obradio se u ovom radu, a parametar mjerenja je pravocrtost površine.

Mjerenje pravocrtosti od velike je važnosti u svim granama proizvodnje gdje se zahtjeva visoka točnost i preciznost pozicioniranja ili mjerenja duljine/pomaka. Svi visokoprecizni mjerni uređaji poput alatnih i mjernih strojevi u industriji sadrže vodilice koje služe za pozicioniranje, što znači da je svaka pogreška na vodilici prisutna u krajnjem rezultatu (pogreška vođenja nalazit će se u rezultatu mjerenja ili u obratku). Odstupanje od pravocrtosti mjernog predmeta može se mjeriti induktivnim ticalom čiji se držač nalazi na vodilici. Odstupanje od pravocrtosti vodilice izračuna se reverzibilnom metodom separacije pogreške (eng. *reversal error separation method*) i ostatak je odstupanje od pravocrtosti predmeta mjerenja.

Reverzibilna metoda separacije pogreške već je dobro poznata metoda koja se nije šire primjenjivala zadnjih nekoliko desetljeća, a razlog tome je visoka točnost uređaja za mjerenje pravocrtosti poput interferometra i autokolimatora. Međutim, zbog konstantnog napredovanja tehnologije i težnje ka postizanju boljih karakteristika koje nameću zahtjeve za visoku točnost i preciznost na razini nanometra, posljednjih godina ponovno se počinje primjenjivati ova metoda. Naime, osim što omogućuje korekciju pogreške vođenja, ova metoda omogućuje i korištenje široko dostupne mjerne opreme (poput induktivnih ticala) za postizanje vrhunske razine točnosti i mjerne nesigurnosti.

Cilj ovog rada je demonstrirati primjenjivost reverzibilne metode separacije pogreške na različitim mjernim metodama, kod kojih se može koristiti induktivno ticalo. Primjena ove metode prikazana je na mjerenju odstupanja od pravocrtnosti korištenjem nekoliko različitih mjernih postava, te na mjerenju odstupanja od kružnosti korištenjem uređaja s okretnim stolom.



Slika 1. Mjerne metode diplomskog rada



## 2. MJERITELJSTVO

### 2.1. Povijest mjeriteljstva

Prva potreba za korištenjem mjera u ljudskoj civilizaciji pojavljuje se tisućama godina prije Krista. Poznavanje mjera i posjedovanje mjernih naprava temelj su napretka i razvoja osnovnih gospodarskih grana poput: poljoprivrede, graditeljstva, trgovine. Tako se razvijaju brojni mjerni sustavi koji se primjenjuju samo na lokalnim područjima. U Egiptu 3000 godina pr. Kr. smrtna kazna prijetila je graditeljima faraonskih hramova i piramida koji bi zaboravili ili zanemarili svoju dužnost umjeravanja etalonske jedinice svakog punog mjeseca. Zbog visoke cijene izrade mjerila i nedovoljnog poznavanja tehnologija prva mjerila su morala biti lakodostupna i trajna. Prema tome, prva mjerila duljine su bili dijelovi ljudskog tijela kao: palac, ruka, lakat, stopalo, a najčešće su te mjere bile uzete od dimenzija dijelova tijela tadašnjeg vladara. Neki od tih sustava mjerenja su zadržana do danas kao što je palac (eng. *inch*). [1],[2],[3]

Pojavom globalizacije stvorila se potreba za univerzalnim jedinicama koje će svi poznavati i koristiti. Glavni problem „lokalnih mjernih sustava“ bio je u trgovini jer se često preračunavalo iz jednog mjernog sustava u drugi što bi uvećalo cijenu robe. Prve promjene na svjetskoj razini u mjeriteljstvu dogodile su se u Parizu 1799. godine kada je napravljen desetični metrički sustav. Iste godine definirana je duljina od jednog metra i masa od jednog kilograma izrađenih od platine i pohranjeni u arhivu Francuske Republike. [2]

### 2.2. Osnovni pojmovi mjeriteljstva

**Mjeriteljstvo** ili metrologija znanost je o mjerenju i njegovoj primjeni. Glavni zadatci mjeriteljstva su: [1],[4]

- **definiranje** međunarodno prihvaćenih mjernih jedinica (kilogram, metar, sekunda..)
- **ostvarivanje** mjernih jedinica znanstvenim metodama
- **utvrđivanje** lanca sljedivosti pri određivanju i dokumentiranju vrijednosti i točnosti mjerenja i prenošenja tog znanja.

Mjeriteljstvo je podijeljeno na tri kategorije prema različitim razinama točnosti i složenosti:“

- **znanstveno mjeriteljstvo** bavi se organizacijom i razvojem mjernih etalona i njihovim održavanjem (najviša razina),
- **industrijsko mjeriteljstvo** treba osigurati prikladno funkcioniranje mjerila koja se upotrebljavaju u industriji i u procesima proizvodnje i ispitivanja koja osiguravaju kvalitetu života građana i za potrebe akademskog istraživanja,
- **zakonsko mjeriteljstvo** bavi se točnošću mjerenja gdje ona utječe na razvidnost gospodarskih transakcija, posebno kada postoji zahtjev za ovjeravanje mjerila“ [1, str. 10].

Mjerni rezultat ili rezultat mjerenja skup je vrijednosti veličine koje se pripisuju mjerenoj veličini zajedno sa svim drugim dostupnim bitnim podacima, odnosno mjerenje je usporedba željene veličine u odnosu na neku definiranu i poznatu veličinu prema izrazu: [4]

$$X = n \bullet Y \quad (1)$$

$X$  – mjerna veličina

$n$  – brojevi omjer mjerne veličine i poznate veličine

$Y$  – odabrana i poznata veličina

Tako se primjerice mjeri temperatura, poznat je pomak žive uslijed promjene temperature i na temelju pomaka žive u termostatu mi očitavamo temperaturu.

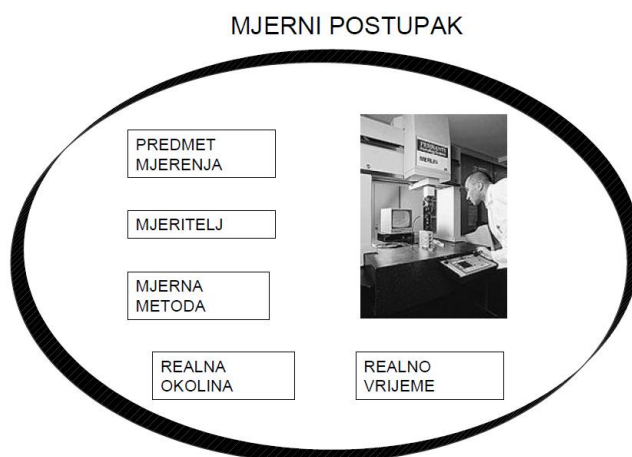
Ni jedan rezultat mjerenja nije sto posto točan, međutim neki rezultati mjerenja su ipak točniji od drugih. Razlog tome su utjecaji okoliša, neiskusnosti ili nesavršenost mjeritelja, korištenje kvalitetnije opreme koja ima veću rezoluciju mjerenja i s kojom onda postizemo nižu mjernu nesigurnost. „Mjerna nesigurnost je definirana kao parametar pridružen rezultatu mjerenja koji opisuje rasipanje vrijednosti koje bi se razumno mogle pripisati mjerenoj veličini uz određenu vjerojatnost“ [6, str. 15]. Mjerna nesigurnost prema tome je „posljedica djelovanja slučajnih utjecaja i ograničenih mogućnosti korekcije sustavnih djelovanja“ [6, str. 16].

Stanje kada se mjerni rezultat izražen u zakonitim jedinicama može s utvrđenim mjernim nesigurnostima dovesti u vezu s referentnim etalonima naziva se mjerno jedinstvo. Mjerno jedinstvo čine: mjeriteljska infrastruktura, međunarodni sustav jedinica SI, etalon, umjeravanje i sljedivost. [5]

Sva mjerenja koja se provode moraju biti rezultat niza definiranih radnji u skladu s određenom metodom mjerenja. Prema tome, mora postojati jasni opis mjerenja koje se naziva mjerni postupak.

„Mjerni postupak podroban je opis mjerenja u skladu s jednim mjernim načelom ili više njih i danom mjernom metodom, na temelju mjernog modela i uključujući izračun kako bi se dobio mjerni rezultat“ [4, str 11]. Ovisno o predmetu mjerenja, sam mjeritelj odabire mjernu metodu i vrijeme mjerenja vodeći pritom računa na uvjete koji ga okružuju, a prostor mjerenja mora biti opremljen adekvatnom opremom koja će omogućiti standardne mjeriteljske uvjete okoline, a to su: [4]

- Temperatura zraka 20 °C
- Tlak zraka 1013.25 mbar
- Relativna vlažnost zraka 58%



**Slika 2. Mjerni postupak [6]**

### 2.3. Etalon, umjeravanje i sljedivost

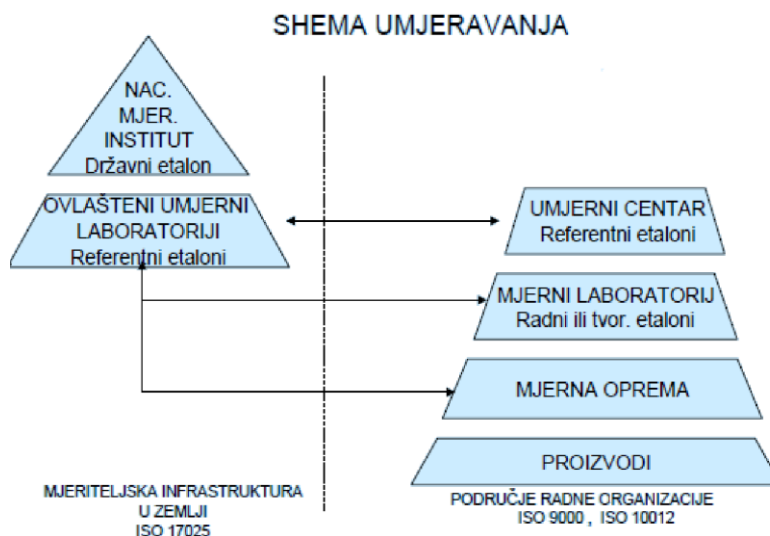
„Mjerni etalon je stvarna mjera, mjerilo, referentna tvar ili mjerni sustav namijenjen za određivanje, ostvarivanje, čuvanje ili obnavljanje jedinice jedne ili više vrijednosti neke veličine kako bi mogao poslužiti kao referenca. Etalon je ostvarenje definicije dane veličine s iskazanom vrijednošću veličine i mjerene nesigurnosti“ [5, str 5]. Postoji više vrsta mjernih etalona povezanih u lanac sljedivosti: [5]

- Međunarodni mjerni etalon
- Državni mjerni etalon
- Primarni mjerni etalon

- Sekundarni mjerni etalon
- Referentni mjerni etalon
- Radni mjerni etalon
- Prijenosni mjerni etalon

Proces definiranja državnog mjernog etalona od međunarodnog mjernog etalona ili proces definiranja bilo kojeg drugog etalona zahtjeva izvođenje procesa umjeravanja mjernog etalona i ostvarivanja svojstva sljedivosti mjernog etalona. Kako bi se od međunarodnog mjernog etalona mogao izraditi referentni mjerni etalon, a od referentnog mjernog etalona izraditi industrijski mjerni etalon potrebno je obaviti proces umjeravanja.

**Umjeravanje** „je skup postupaka kojim se u određenim uvjetima uspostavlja odnos između vrijednosti veličina koje pokazuje neko mjerilo ili mjerni sustav ili vrijednosti koje pokazuje neka materijalizirana mjera ili neka referencijska tvar i odgovarajućih vrijednosti ostvarenih etalonima“ [5, str 5]. O obavljenom umjeravanju se izdaje potvrda ili se zalijepi naljepnica na umjereno mjerilo/etalon.



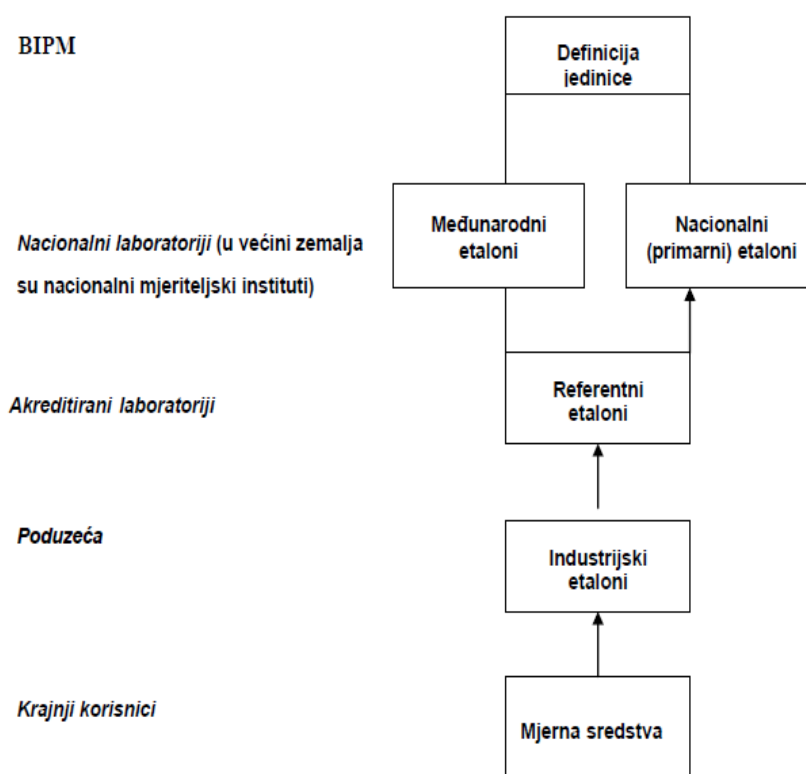
**Slika 3. Shema umjeravanja [6]**

„Četiri su glavna razloga za umjeravanje mjerila:

1. uspostavljanje i prikaz sljedivosti
2. osiguravanje da očitavanja mjerila budu sukladna s drugim mjerenjima
3. određivanje točnosti očitavanja mjerila
4. utvrđivanje pouzdanosti mjerila tj. može li mu se vjerovati“ [1, str 18].

Dakle, umjeravanje je ključan faktor za ostvarivanje lanca sljedivosti. Bez umjeravanja ne može se postići sljedivosti.

**Sljedivost** „predstavlja svojstvo mjernog rezultat da se dovodi u vezu s navedenim referencijskim etalonima (obično državnim ili međunarodnim) korištenjem neprekinutih lanaca umjeravanja od kojih svako umjeravanje doprinosi utvrđenoj mjernoj nesigurnosti. Prema tome, lanac sljedivosti je neprekidan lanac usporedbi, od kojih svaka ima utvrđenu mjernu nesigurnost. Time se osigurava da mjerni rezultat ili vrijednost etalona bude povezana s referentnim etalonima na višoj razini“ [5, str. 6]. Na slici 2. prikazan je lanac sljedivosti mjernih etalona.



Slika 4. Lanac sljedivosti [5]

Na primjeru etalon duljine pojasnit će se lanac sljedivosti. Osnovna mjerna jedinica za duljinu je metar, definiran kao „duljina puta koju svjetlost prevali u vakuumu tijekom vremena od 1/299 792 458 sekundi. Metar se ostvaruje na primarnoj razini s pomoću valne duljine jodom stabiliziranog helijsko-neonskog lasera“ [1, str. 17]. Prvo mjesto u lancu sljedivosti zauzima definicija jedinice prema kojoj nastaju svi međunarodni ili nacionalni (primarni) mjerni etaloni. Međunarodni mjerni etalon prihvaćen je od strane potpisnika međunarodnog sporazuma i predstavlja referentnu mjeru jednog metra. Svaki akreditirani laboratoriji za umjeravanje svog referentnog mjernog etalona koristi međunarodni ili

nacionalni etalon. Akreditirani laboratoriji (na primjeru mjerenja duljine) izvršava kontrolu mjernih uređaja iz industrije. Potrebno je naglasiti činjenicu da svaki idući etalon počevši od vrha lanca sljedivosti ima veću mjernu devijacijnost. Referentni mjerni etalon koristi se za umjeravanje industrijskih etalona prema kojima se onda vrši proizvodnja ili kontrola mjernih alata. Na kraju lanca sljedivosti nalaze se mjerna sredstva odnosno mjerni alati koje krajnji korisnici kupuju u trgovinama poput metra, pomičnog mjerila, mikrometra, itd.

## 2.4. Pogreške mjernog sustava

Cilj svakog mjerenja je određivanje točne veličine mjerenog predmeta. Međutim, mjerenja nikad nisu savršena niti apsolutna točna zbog utjecaja okoline mjerenja ( npr. promjene temperature, vibracija tla, vlažnosti zraka), nesavršenost mjernih uređaja, ljudskih propusta, itd. Dakle, svako mjerenje sadrži pogrešku mjerenja odnosno razliku izmjerene vrijednosti od stvarne vrijednosti veličine. Prema tome, svakim mjerenjem želi se izmjeriti vrijednost što bliže stvarnoj veličini tako da pogreška mjerenja bude minimalna.

$$P = X_i - X_s \quad (2)$$

Pri čemu  $P$  označava mjernu pogrešku,  $X_i$  izmjerenu vrijednost, a  $X_s$  stvarnu vrijednost

Pogreške se prema uzroku nastajanja dijele na:

- Sustavne pogreške
- Slučajne pogreške
- Grube pogreške

### 2.4.1. Sustavne pogreške

Sustavne pogreške su predvidive i prilikom ponavljanja mjerenja ostaju stabilne ili se mijenjaju na predvidiv način. Uzroci sustavnih pogrešaka su loša metoda mjerenja, utjecaji okoline, istrošenost uređaja, deformacije mjernog objekta, konstrukcijski nedostaci, takve pogreške se lako mogu umanjiti ili potpuno ukloniti, a njihova posljedica je netočan rezultat mjerenja. [5]

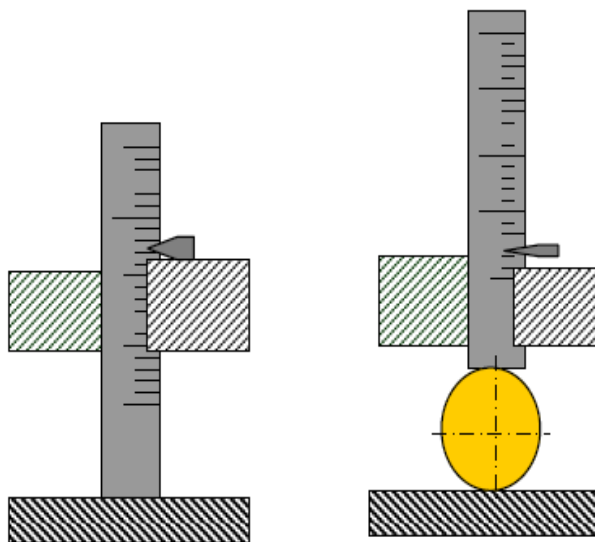
„Netočnost je razlika između dobivenog rezultata mjerenja i referentne vrijednosti“ [5, str 8].

Primjeri sustavnih pogrešaka su:

1. Geometrijske greške 1. i 2. reda - nastaju zbog neparalelnosti mjerne površine i mjernog instrumenta.

Geometrijska pogreška prvog reda zove se Abbeova pogreška i pojavljuje se kod instrumenata kojim se predmet mjerenja ne nalazi u nastavku mjerne skale. Abbeova pogreška je najznačajnija po iznosu.

Geometrijska pogreška drugog reda pojavljuje se kod instrumenata kojim se predmet mjerenja nalazi u nastavku mjerne skale.



Slika 5. Abbeov princip mjerenja [5]

## 2. Linearna pogreška

„Linearna pogreška je stalan linearni rast ili pad vrijednosti pogreške rezultata mjerenja unutar određenog područja“ [5, str 12].

## 3. Sustavne pogreške zbog utjecaja temperature

„Standardna temperatura provođenja mjerenja iznosi 20 °C. Ako se mjerenje provodi na različitoj temperaturi, treba uvesti temperaturnu korekciju i ispraviti rezultat mjerenja “[5, str 13].

### 2.4.2. Slučajne pogreške

Slučajne pogreške se pojavljuju tijekom ponovljenih mjerenja iste veličine na nepredvidiv način. Takve pogreške se teško uočavaju i definiraju te se zbog toga ne mogu otkloniti, a njihova posljedica je nepreciznost mjernog rezultata.

„Mjerna preciznost je bliskost slaganja između izmjerenih vrijednosti veličine dobivenih ponovljivim mjerenjima na istim ili sličnim predmetima pod utvrđenim uvjetima. Utvrđeni uvjeti mogu predstavljati uvjete obnovljivosti i uvjete ponovljivosti. Mjerna preciznost obično se izražava mjerama nepreciznosti kao što su standardno odstupanje, varijanca ili koeficijent promjene pod utvrđenim mjernim uvjetima“ [5, str 15].

#### 1. Preciznost u uvjetima ponovljivosti

Ponovljivost je usko slaganje rezultata mjerenja kada ponavljamo mjerenje istog objekta pod istim uvjetima mjerenja koji uključuju: [5]

- isti mjerni postupak
- istog mjeritelja
- isto mjerno mjesto
- ponavljanje u kratkom vremenu

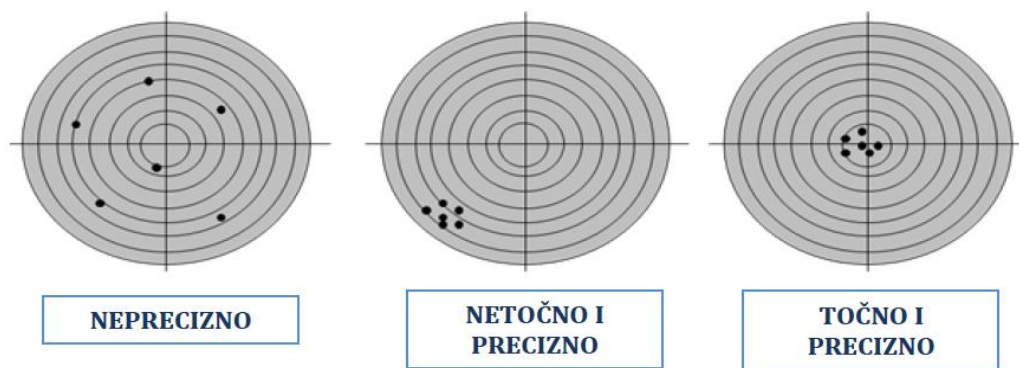
#### 2. Preciznost u uvjetima obnovljivosti

Obnovljivost je rasipanje rezultata koje postizemo kada više mjeritelja mjeri više puta istu karakteristiku uz korištenje istog ili različitog mjernog uređaja. Obnovljivost najviše određuje utjecaj mjeritelja i/ili mjerne opreme u varijaciji mjernog sustava. Promijenjeni uvjeti u slučaju obnovljivosti podrazumijevaju: [5]

- mjerno načelo
- mjernu metodu
- mjeritelja
- mjerni instrument
- referentni etalon
- mjesto, uvjete uporabe, vrijeme

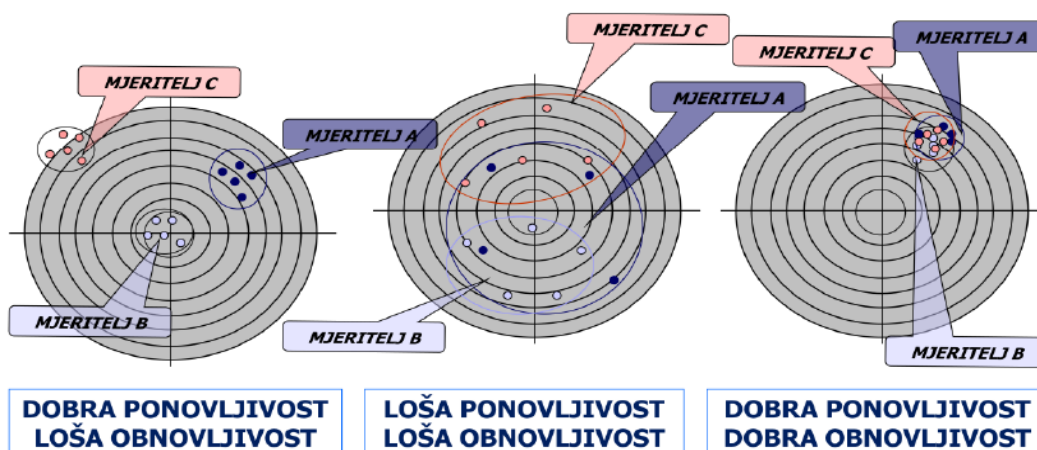
Kao što je poznato rezultati mjerenja odstupaju od stvarne vrijednosti ovisno o pogrešci koju sadrže. Važno je moći dobro pozicionirati rezultate mjerenja u odnosu na stvarnu veličinu i na ostala dosadašnja mjerenja. Tako se u mjeriteljstvu pojavljuju dva veoma značajna pojma točnosti i preciznosti. Oni su od velike važnosti u mjeriteljstvu i najčešće se javljaju zajedno. Razliku između točnosti i preciznosti najlakše je prikazati na primjeru streljačkih meta prikazanih na slici 4.





Slika 6. Točnost i preciznost [5]

„Nema smisla govoriti o točnosti u slučaju loše preciznosti!“, [5 str. 17 ]. Preciznost u uvjetima ponovljivosti i obnovljivosti prikazana je na slici 7.



Slika 7. Preciznost u uvjetima ponovljivosti i obnovljivosti [5]

### 2.4.3. Grube pogreške

Grube greške su lako uočljive pogreške koje karakterizira značajno odstupanje u odnosu na ostale rezultate pri ponavljanju mjerenja. Ovakve greške mogu nastati zbog korištenja neispravnog mjernog uređaja, neodgovarajuće mjerne metode, nepažnje mjeritelja, očitavanje vrijednosti s pogrešne mjerne skale, izostavljanjem znamenki prilikom očitavanja skale. Posljedica ovakvih pogrešaka je jasno uočljiva u odnosu na ostale rezultate mjerenja. One daju netočan rezultat zbog čega se pojedini rezultat izbacuje iz analize mjerenja.

### 3. Odstupanje od pravocrtnosti i kružnosti

Prilikom konstruiranja strojarskih dijelova geomerijske značajke predmeta se definiraju kao idealna geometrijska tijela. Idealne elementarne oblike nemoguće je ostvariti zbog nedostatka alatnih strojeva, mjernih uređaja, nesavršenosti ljudi, materijala i zbog utjecaja okoline. Zato izrađeni predmeti uvijek sadrže određenu pogrešku, odnosno odstupanje od željene mjere. Ovisno o namjeni dijelova i cijeni izrade, dopuštena odstupanja variraju. Područje u kojem su granice dozvoljenih odstupanja naziva se tolerancija dimenzija.

Tijekom izrade dijelova postoji potreba za geometrijskom kontrolom izrađenih predmeta. Geometrijsko definiranje odstupanja se zadaje tolerancijama oblika, tolerancijama položaja i složenim tolerancijama. Dimenzijske i geometrijske tolerancije specificirane su unutar diplomskog rada. Izrađeni dijelovi trebaju se mjeriti i usporediti sa željenom vrijednošću kako bi postigli višu kvalitetu proizvoda.

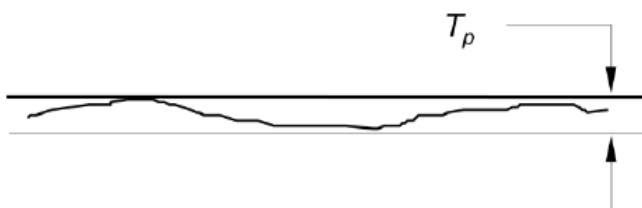
TOLERANCIJE OBLIKA		TOLERANCIJE POLOŽAJA		SLOŽENE TOLERANCIJE	
Karakteristika koja se tolerira	Simbol	Karakteristika koja se tolerira	Simbol	Karakteristika koja se tolerira	Simbol
1.1 pravocrtnost		2.1 paralelnost		3.1 netočnost okretanja	
1.2 ravnoća		2.2 okomitost		3.2 radijalna netočnost okretanja	
1.3 kružnost		2.3 kut nagiba		3.3 aksijalna netočnost okretanja	
1.4 cilindričnost		2.4 lokacija			
1.5 oblik linije		2.5 koncentričnost			
1.6 oblik površine		2.6 simetričnost			

Slika 8. Simboli tolerancija oblika, tolerancija položaja i složenih tolerancija [5]

Za potrebe ovog rada obradit će se dvije česte tolerancije oblika: pravocrtnost i kružnost.

### 3.1. Pravocrtnost

Pravocrtnost označava stanje kod kojeg je element površine ravna linija. Dopušteno odstupanje od pravocrtnosti definirano je dvjema ravnim paralelnim linijama unutar kojih se nalazi stvarni oblik površine. Vrijednost odstupanja od pravocrtnosti označeno je sa  $T_p$ , slika 9. [5],[7].



Slika 9. Odstupanje od pravocrtnosti [5]

Na slici 10. prikazan je primjer tolerancije pravocrtnosti. Ova tolerancija označava da se svaka linija cilindrične površine nalazi između dvije ravne paralelne linije udaljene za 0,1 mm.



Slika 10. Primjer tolerancije pravocrtnosti [8]

#### 3.1.1. Metode mjerenja odstupanja od pravocrtnosti

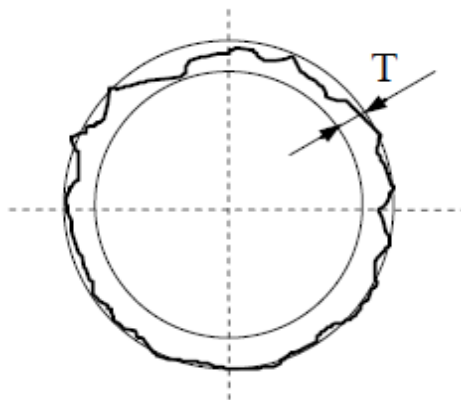
Metode mjerenja odstupanja od pravocrtnosti važne su proizvodnji gdje postoje zahtjevi na visoku točnost i preciznost pozicioniranja. Svi uređaji visoke točnosti sadrže određene vodilice. Ukoliko vodilice sadrže veće odstupanje od pravocrtnosti nego što je propisano, greška odstupanja bit će prisutna u krajnjem rezultatu uređaja koji koristi te vodilice. Odstupanje od pravocrtnosti može se mjeriti s više instrumenata, a ovisno koliku preciznosti želimo postići odabiremo jedan od sljedećih instrumenata:

- Induktivno ticalo s vanjskim vođenjem

- Trokordinatni mjerni uređaj
- Autokolimator
- Laserski interferometar
- Alatni mikroskop

### 3.2. Kružnost

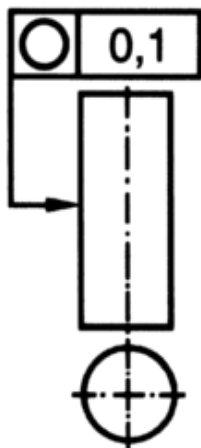
Dijelovi kružnog poprečnog presjeka česti su u strojarstvu i gotovo svaki pokretni sklop sadrži barem jednu komponentu kružnog oblika. S današnjom tehnologijom industrije nemoguće je izraditi komad takav da opisuje idealan krug. Upravo tolerancija kružnosti opisuje koliko je odstupanje oblika od idealnog kruga.



Slika 11. Odstupanje od kružnosti [5]

Dozvoljeno odstupanje od kružnosti definirano je površinom između dviju koncentričnih kružnica, čija razlika iznosi  $T$ , slika 11.. Svaka točka mjerenog objekta mora se nalaziti unutar definirane površine kružnog vijenca. Površina tolerancije kružnosti leži na ravnini koja je okomita na glavnu os kružnog objekta [6],[9].

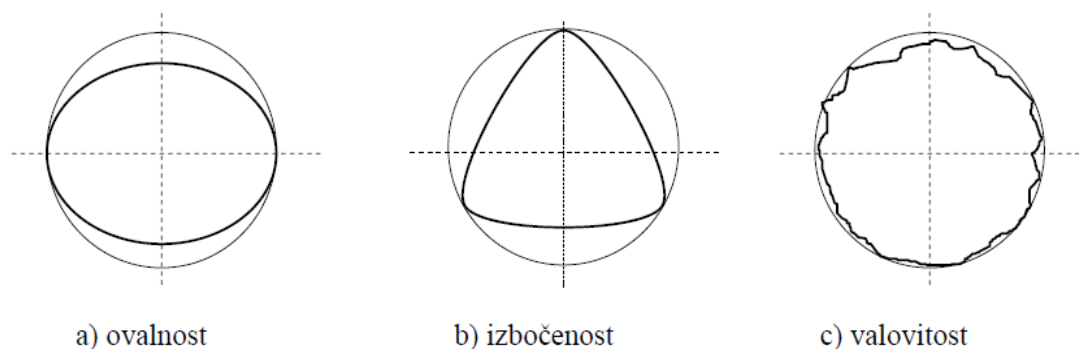
Na slici 12. prikazan je primjer tolerancije kružnosti. Opseg bilo kojeg poprečnog presjeka cilindra mora se nalaziti između dvije koncentrične kružnice međusobno udaljene 0,1 mm.



Slika 12. Primjer tolerancije kružnosti [10]

Najčešći uzroci karakterističnih pogrešaka kružnosti su:

- Ovalnost, kao posljedica nepodešenosti osi alatnog stroja ili zbog oštećenja šiljaka ili gnijezda alatnog stroja. Riječ je o pogrešci prvog reda.
- Izbočenost kao posljedica prejakog stezanja obratka u strojnom škripcu, ili kao rezultat odabrane tehnologije izrade (poput brušenja bez šiljaka).
- Valovitost kao posljedica vibracija alatnog stroja ili posljedica nedovoljne krutosti izratka [6].



Slika 13. Najčešće pogreške kružnosti [5]

### 3.2.1. Metode ispitivanja odstupanja od kružnosti

Metode ispitivanja odstupanja od kružnosti su:

1. Metode ispitivanja kružnosti s unutrašnjom mjernom referencom

- dijametralno ispitivanje kružnosti
- ispitivanje kružnosti primjenom mjernih šiljaka
- ispitivanje kružnosti primjenom V-prizmi

„Zajednička značajka (nedostatak) ovih metoda je u tome što je mjerna referenca u toku ispitivanja kružnosti promjenjiva. Razlog tome leži u određivanju mjerne reference na temelju elemenata površine ispitivanog predmeta mjerenja“ [6, str 46].

2. Metode ispitivanja kružnosti s vanjskom mjernom referencom

- tip rotirajućeg stola
- tip rotirajućeg ticala

„Kod ove metode ispitivanja kružnosti za mjernu referencu se uzima os rotacije vrlo precizno izrađenog vretena, čija točnost rotacije mora biti unutar strogo propisanih granica. Primjenom ove metode ispitivanja kružnosti dobiva se stvarna slika geometrijskog stanja ispitivane površine i informacije koje su u tijesnoj vezi s funkcionalnošću dijelova“ [6 str 50].

## 4. METODE MJERENJA ODSUPANJA OD PRAVOCRTNOSTI I KRUŽNOSTI

Vodilice alatnih strojeva i mjernih uređaja imaju ključnu ulogu u proizvodnim procesima i u procesu mjerenja karakteristika. Oni su široko rasprostranjeni u industriji stoga je važno izučavati njihovu formu kako bi se unaprijedila točnost i preciznosti ovih uređaja. Konstrukcija uređaja koji će moći izmjeriti pogrešku vođenja zanimljiva je za proizvođače alatnih strojeva, ali i za krajnje korisnike, jer ako znamo pogrešku vođenja može se napraviti kompenzaciju i poboljšati performanse stroja [11].

Svaki strojarski dio sadrži određenu pogrešku. Geometrijskoj pogrešci pravocrtnosti pridjeljuje se najveća važnost za postizanje visokih performansi alatnih strojeva i trokordinatnih mjernih uređaja. Postoje brojne metode kojima je moguće utvrditi odstupanja od pravocrtnosti vodilica, od kojih su najčešće primjenjivani laserski interferometar, koincidentna libela, autokolimator, te induktivno ticalo s vanjskim vođenjem. Posljednja se metoda relativno jednostavno može unaprijediti provođenjem separacije pogreške vođenja od pogreške (odstupanja od pravocrtnosti) samog predmeta mjerenja.

### 4.1. Reverzibilna metoda separacije pogreške

Na primjeru uporabe induktivnog ticala s vanjskim vođenjem lako se može pojasniti potreba za separacijom pogreške vođenja od pogreške predmeta mjerenja. Ova metoda u velikoj mjeri ovisi o odstupanju od pravocrtnosti vanjskog vođenja ticala (najčešće precizne vodilice na koju je postavljeno induktivno ticalo). Ukoliko bi vanjsko vođenje bilo idealno, tada bi pomaci ticala odgovarali samo odstupanju od pravocrtnosti predmeta mjerenja. Budući da to nije moguće, ovisno o zahtijevanoj točnosti mjerenja moguće je utvrditi iznos pogreške samog vođenja, a potom i provesti odgovarajuću korekciju rezultata koji se odnose na predmet mjerenja. Postoji više metoda separacije pogreške, a to su: [11]

- Reverzibilna metoda separacije pogreške
- Metoda višestrukih mjerenja (*eng. multistep methods*)
- Metoda višestrukih ticala (*eng. multiprobe methods*)

Reverzibilna metoda je univerzalna metoda koja se može primijeniti za mjerenje odstupanja različitih tolerancija oblika kao što su pravocrtnost, ravnost, kružnost. Glavna

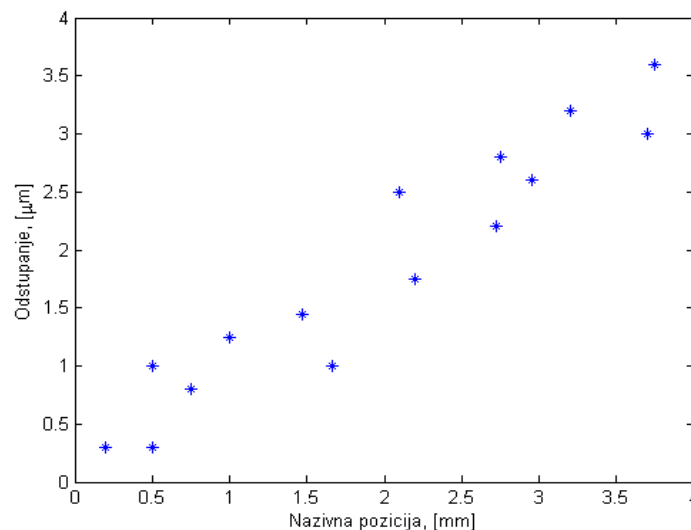
pretpostavaka reverzibilne metode je da se pogreška pravocrtnosti mjerenog predmeta može odvojiti od pogreške vođenja.

Neobrađeni rezultati mjerenja sadrže ukupnu pogrešku pravocrtnosti i pogrešku nesuosnosti. Ukupna pogreška pravocrtnosti je pogreška pravocrtnosti mjernog predmeta i pogreška pravocrtnosti vodilice (pogreška vođenja) na kojoj se nalazi i po kojoj se kreće mjerno ticalo. Prisutna je pogreška nesuosnosti, odnosno os vodilice nije paralelna s osi predmeta mjerenja.

Prvi korak reverzibilne metode separacije pogreške je mjerenje, koje se vrši s određenim korakom, svakih  $n$  milimetara s obzirom na predmet mjerenja. Da bi se moglo prijeći na idući korak analize rezultata mjerenja potrebno je ukloniti pogrešku nesuosnosti primjenom metode najmanjih kvadrata [12].

#### 4.1.1. Metoda najmanjih kvadrata

“Metoda najmanjih kvadrata jedna je od najvažnijih metoda za obradu eksperimentalno dobivenih podataka. S pomoću regresijske jednadžbe, regresijskom analizom nastoji se u dijagram rasipanja ucrtati pravac regresije, koji će najbolje opisati odnos promatranih varijabli“ [13, str. 7].



Slika 14. Set podataka mjerenja

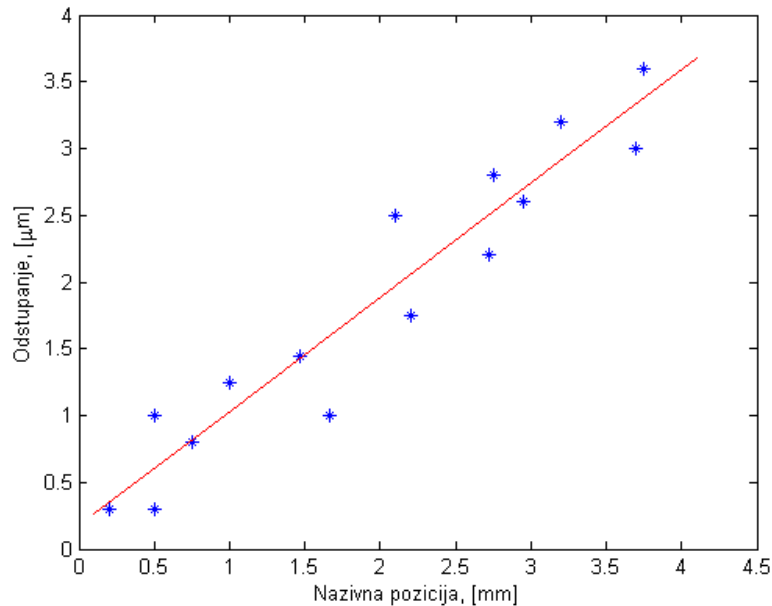
Zapišemo li podatke mjerenja u dijagram kao na slici 14. dobit ćemo set podataka kroz koji je moguće provući beskonačno mnogo pravaca. Međutim cilj je dobiti jedan pravac koji najbolje opisuje navedene podatke. To je regresijski pravac, “kojim su minimizirane udaljenosti svih koordinatnih točaka upisanih u dijagram rasipanja.”



[13, str. 7], slika 14.

Prvi korak metode najmanjih kvadrata je mjerenje veličina  $T(x_i, y_i)$ , odnosno imamo niz podataka:  $(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_n, y_n)$  koji u dijagramu predstavljaju oblak rasipanja. Ukoliko se može pretpostaviti linearna ovisnost podataka mjerenja, vrijedi izraz:

$$f(a,b) = y = b + ax \quad (3)$$



**Slika 15. Regresijski pravac metode najmanjih kvadrata**

Kada bi svi podaci mjerenja ležali na jednom pravcu to bi bio idealan slučaj. Međutim podaci mjerenja su raspršeni i treba odrediti pravac koji ih najbolje opisuje.

“Pravac iz jednadžbe (3) najvjerojatniji je pravac regresije ako vrijedi da je suma kvadratnog odstupanja dana izrazom“ [13, str. 11]:

$$f(a,b) = \sum_{i=1}^n [y_i - (ax_i + b)]^2 = \min \quad (4)$$

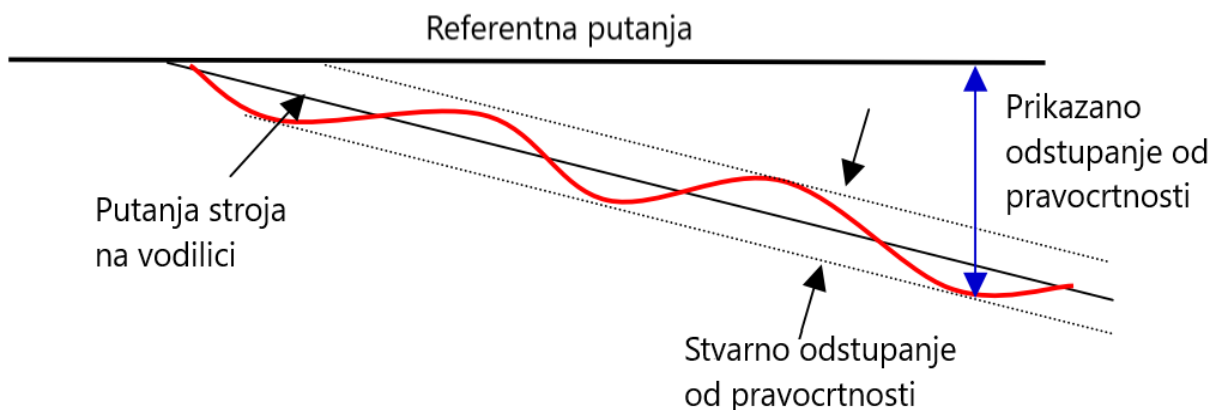
,gdje su koeficijenti  $a$  i  $b$  definirani kao:

$$a = \frac{n \sum_{i=1}^n x_i y_i - \sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n y_i}{n \sum_{i=1}^n x_i^2 - (\sum_{i=1}^n x_i)^2} \quad (5)$$

$$b = \frac{\sum_{i=1}^n y_i - a \sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (6)$$

, pri čemu je  $n$  broj mjernih točaka.

Nakon mjerenja iz rezultata treba odvojiti ukupnu pogrešku pravocrtnosti od pogreške nesusnosti. Svako mjerenje određenog predmeta je oblak podataka koje sadrži određene pogreške. Međutim svako novo mjerenje istog predmeta je novi set podataka koje sadrži neke drugačije pogreške, prije svega nesusnost, od prethodnog mjerenja. Kako bi se mogla usporediti različita mjerenja istog mjernog predmeta moraju se eliminirati njihove pogreške. U slučaju ovog rada to je nesusnost, koja je neizbježno prisutna između osi predmeta mjerenja i osi mjernog uređaja (vodilice).



Slika 16. Prikaz pogreške vođenja i pogreške pravocrtnosti

Prilikom svakog novog mjerenja pojavljuje se drugačiji kut nagiba i odsječak pravca. Zato moramo svesti pravce metodom najmanjih kvadrata na isti nagib kako bi eliminirali nesusnost i mogli napraviti usporedbu pravaca.

Metodom najmanjih kvadrata eliminira se pogreška nesusnosti i to za svaku točku mjerenja  $T(x_i, y_i)$  kao:

$$z = \sum_{i=1}^n [y_i - (\alpha \cdot x_i + O)] \quad (7)$$

Pri čemu je  $\alpha$  nagib pravca,  $O$  odsječak pravca,  $z$  nova vrijednost koja se može zapisati kao  $T_1(z_i, y_i)$  koja ne sadrži pogrešku nesusnosti, zbog čega se skupovi podataka mjerenja sada mogu usporediti i nastaviti s daljnjom analizom rezultata.

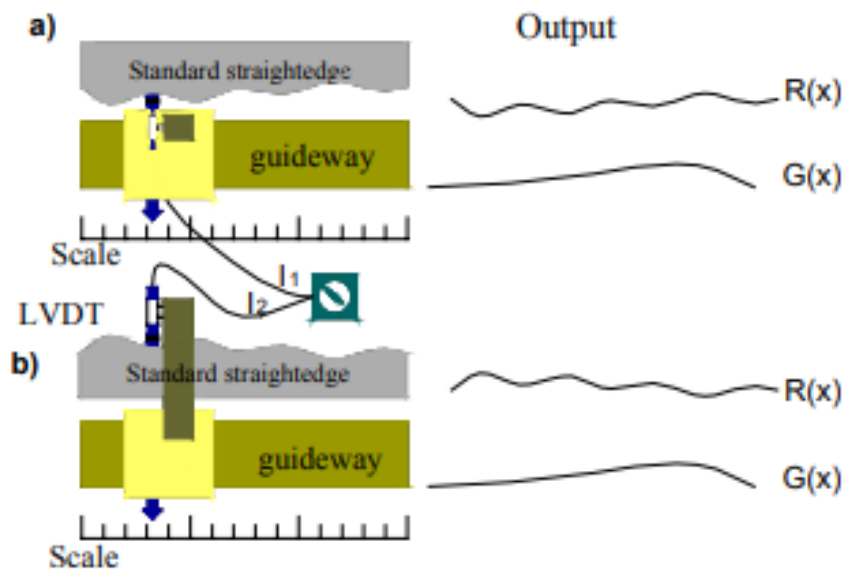
#### 4.1.2. Pogreška pravocrtnosti i pogreška vođenja

Sada se može razdvojiti pogrešku vođenja od pogreške pravocrtnosti predmeta mjerenja. Na slici 17. prikazan je koncept reverzibilne metode separacije pogreške.

Princip mjerenja je da se izvrše dva mjerenja s različitim orijentacijama mjernog predmeta i ticala, dok se položaj vodilice ne mijenja.

Prvim mjerenjem mjerni predmet i induktivno ticalo položimo u proizvoljnu orijentaciju. U ovom slučaju slika 17 a). mjerena ploha gleda prema dolje. Rezultat mjerenja je krivulja  $I_1$  koja sadrži pogrešku vođenja  $G(x)$  i pogrešku pravocrtnosti predmeta mjerenja  $R(x)$ :

$$I_1(x) = G(x) + R(x) \quad (8)$$



Slika 17. Shema reverzibilne metoda separacije pogreške [12]

Prije drugog mjerenja mjerni predmet i induktivno ticalo zaokrene se za  $180^\circ$  tako da mjerna ploha gleda prema gore, a ticalo bude u dodiru s predmetom mjerenja kao na slici 17 b).

Rezultat mjerenja je krivulja  $I_2$  koja sadrži pogrešku vodilice  $G(x)$  i pogrešku predmeta mjerenja  $R(x)$ .

$$I_2(x) = -G(x) + R(x) \quad (9)$$

Zadatak rada je odrediti pogrešku vođenja i pogrešku pravocrtnosti predmeta mjerenja zasebno, stoga uvodimo sljedeće formule:

$$G(x) = \frac{I_1(x) - I_2(x)}{2} \quad (10)$$

$$R(x) = \frac{I_1(x) + I_2(x)}{2} \quad (11)$$

Iz formula je jasno da pogrešku vođenja čini polovina razlike krivulja  $I_1$  i  $I_2$ , dok se pogreška pravocrtnosti predmeta mjerenja određuje kao polovina zbroja krivulja  $I_1$  i  $I_2$ .

#### 4.1.3. Ponovljivost

Na rezultat mjerenja utječu pogreške, koje za posljedicu imaju rasipanje rezultata mjerenja. Zbog toga je potrebno procijenti preciznost rezultata mjerenja na temelju višestrukih ponovljenih mjerenja – preciznost u uvjetima ponovljivosti. Za iskazivanje ponovljivosti najčešće se koristi izračun procijenjenog standardnog odstupanja. [14]

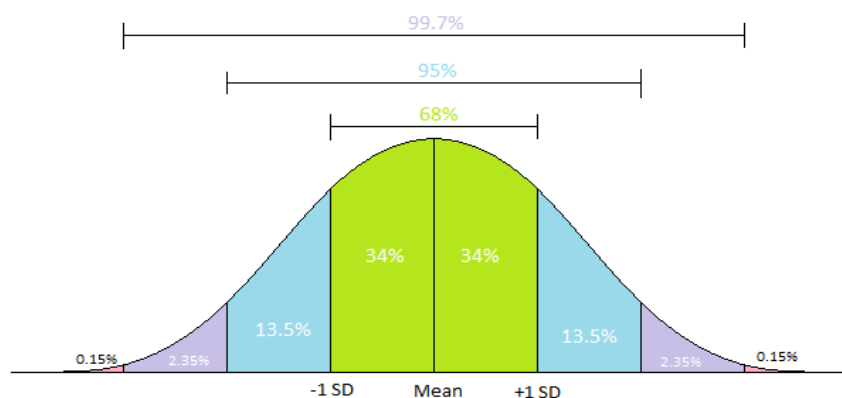
Procijenjeno standardno odstupanje je statistički pojam koji označava mjeru raspršenosti ili disperzije podataka u skupu koji je distribuiran prema normalnoj razdiobi. Interpretira se kao prosječno odstupanje od srednje vrijednosti i to po apsolutnom iznosu. Formula (12) predstavlja aritmetičku sredinu vrijednosti  $x$ : [14]

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^N x_i}{N} \quad (12)$$

Konačno slijedi matematički izraz za procijenjeno standardno odstupanje :

$$s = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2} \quad (13)$$

Iz grafa normalne razdiobe vidi se koja je vrijednost odstupanja od pravocrtnosti najzastupljenija, Slika 18. Nisko standardno odstupanje ukazuje da su podaci koncentrirani blizu sredine skupa, dok visoko standardno odstupanje ukazuje da su podaci šire rasprostranjeni u skupu.



Slika 18. Graf normalne razdiobe [14]

## 4.2. Induktivno ticalo

Induktivno ticalo pasivni je električni senzor. To znači da se energija neophodna za mjerenje i transport izlaznog signala dobiva s objekta mjerenja. Rad elektromagnetskog senzora temelji se na elektromagnetskoj indukciji odnosno ovisnosti induktivnosti zavojnice o promjene otpora elektromagnetskog kola. Induktivnost zavojnice s jezgrom od feromagnetskog materijala i zračnim zazorom računa se kao: [16]

$$L = \frac{N_z^2}{Z_m} = \frac{N_z^2}{\sqrt{(R_m + R_\delta)^2 + R_g^2}} = \frac{N_z^2}{\sqrt{\left[\frac{l_m}{\mu_0 \mu_r S_m} + \frac{2\delta}{\mu_0 S_\delta}\right]^2 + \left[\frac{2P_m}{N\Phi_m^2}\right]^2}} \quad (14)$$

, pri čemu je  $N_z$  broj zavoja a  $Z_m$  ukupni magnetski otpor.

Induktivnost ticala mijenja se ovisno o promjeni zazora između jezgre i pokretnog dijela od feromagnetika (kotva). Kada se kotva približi jezgri zazor se smanji, a induktivnost naraste [16].



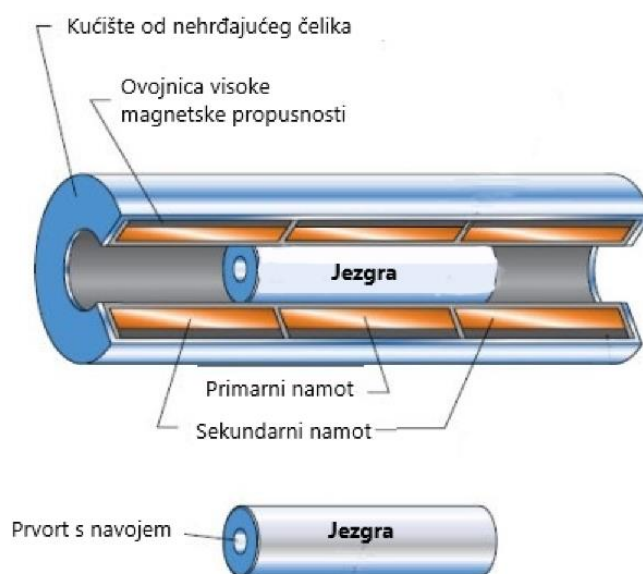
Slika 19. Induktivno ticalo

### 4.2.1. LVDT senzor

Induktivno ticalo radi na principu LVDT senzora odnosno linearnog varijabilnog diferencijalnog transformatora. To je tip elektromehaničkog pretvarača koji može pretvoriti pravocrtno gibanje objekta na koje je mehanički spojen u odgovarajući električni signal. LVDT linearni senzori položaja lako su dostupni i mogu mjeriti pomake od desetak

nanometara do desetak milimetara. LVDT senzor ne zahtijeva električni kontakt između pokretnog dijela (jezgre) i zavojnice, već se umjesto toga bazira na elektromagnetskom povezivanju. Na slici 20. prikazane su komponente LVDT senzora.

LVDT senzori su robusni apsolutni pretvarači pomaka, inherentni bez trenja, imaju praktički beskonačan životni vijek kada se pravilno koriste. Mogu biti konstruirani za rad pri niskim temperaturama do  $650^{\circ}\text{C}$ , u teškim uvjetima, pod visokim razinama vibracija i udara. LVDT senzori imaju široki spektar primjene u: hidraulici, automatizaciji, nuklearnom reaktoru, satelitima, zrakoplovima, turbinama... Ovi pretvarači imaju nisku histerezu i izvrsnu ponovljivost. [17][18]



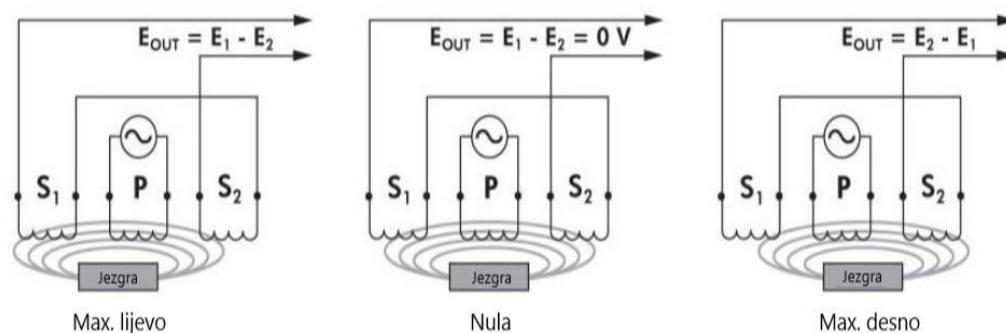
**Slika 20. Komponente LVDT senzora [18]**

Unutarnja struktura transformatora sastoji se od primarnog namota centriranog između para identično namotanih sekundarnih namota, simetrično raspoređenih oko primarnog. Pomični element LVDT je zasebna cjevasta struktura izrađena od magnetski propustljivog materijala. To se naziva jezgra koja se može slobodno pomicati uzduž provrta zavojnice. Taj provrt je dovoljno velik da osigura dovoljni razmak između jezgre i provrta bez fizičkog kontakta jezgre sa svitkom. Prilikom rada, LVDT primarni namot je pod naponom izmjenične strujom odgovarajuće amplitude i frekvencije, poznat kao primarna uzbuda. LVDT-ov električni izlazni signal je diferencijalni izmjenični napon između dvaju sekundarnih namotaja koji varira s aksijalnim položajem jezgre unutar LVDT zavojnice.

LVDT-ov primarni namot  $P$  napaja se stalnim amplitudnim izmjeničnim izvorom. Tako razvijeni magnetski tok povezan je jezgrom sa susjednim sekundarnim namotima  $S_1$  i  $S_2$ . Ako

je jezgra smještena na sredini između  $S_1$  i  $S_2$  jednaki magnetski tok inducira se na oba sekundarna namotaja tako da su naponi  $E_1$  i  $E_2$  jednaki. U tom referentnom srednjem položaju jezgre, poznatoj kao nulta točka, diferencijalni izlazni napon ( $E_1 - E_2$ ) je nula. Kao što je prikazano na slici 21. ako se jezgra pomakne bliže  $S_1$  nego  $S_2$  više je navoja spojeno na  $S_1$ , a manje na  $S_2$  tako da je inducirani napon  $E_1$  povećan dok je  $E_2$  smanjen. Obrnuto, ako se jezgra pomakne bliže  $S_2$  više je navoja spojeno na  $S_2$  i manje na  $S_1$  tako da se  $E_2$  povećava kako se  $E_1$  smanjuje.

Vrijednost  $E_{OUT}$  pri maksimalnom pomaku jezgre od nule ovisi o amplitudama primarnog napona uzbude i faktoru osjetljivosti određenog LVDT-a, ali je tipično nekoliko volti. [18]



Slika 21. Izlazni signal u ovisnosti položaja jezgre LVDT senzora [18]

#### 4.3. Trokordinatni mjerni uređaj

Trokordinatni mjerni uređaj (*engl. CMM – Coordinate measuring machines*) je mjerni instrument koji se koristi za prostorno mjerenje geometrijskih značajki objekata (npr. duljine, kutova, ploha, oblika, provrta, itd.). Mjerenje CMM uređajem može se izvršiti ručno (upravljano od strane operatera) ili računalno. Mjerenja se obavljaju pomoću ticala koje je pričvršćeno na treću ( $Z$ ) os stroja. Primjer trokordinatnog mjernog uređaja je na Slika 22.

Osnovni princip rada trokordinatnog mjernog uređaja sastoji se od identificiranja kordinatnih položaja točaka, crta i površina u  $X$ ,  $Y$  i  $Z$  osi. Predmet koji se želi izmjeriti postavlja se na radnu površinu stroja (s ovim korakom ispunjavamo *Abbeov* princip mjerenja jer se predmet nalazi u produžetku mjerne skale) i fiksira u najpovoljnijoj orijentaciji. Najpovoljnija orijentacija ovisi o mjerenom komadu, a označava onu orijentaciju predmeta iz koje ćemo moći najlakše pristupiti svim željenim karakteristikama uz najmanji broj promjene orijentacije glave mjernog uređaja, odnosno ticala. Pomoću izmjerenih kordinata, računalnim

putem se stvara numerička slika površine koja formira objekt. Minimalan broj potrebnih točaka ovisi o tome što se mjeri. Za definirati pravac potrebno je najmanje dvije točke, za definirati kružnicu najmanje tri točke, za površinu tri nekolinearne točke. Točniji rezultat mjerenja se dobije na temelju većeg broja mjernih točaka. [16]



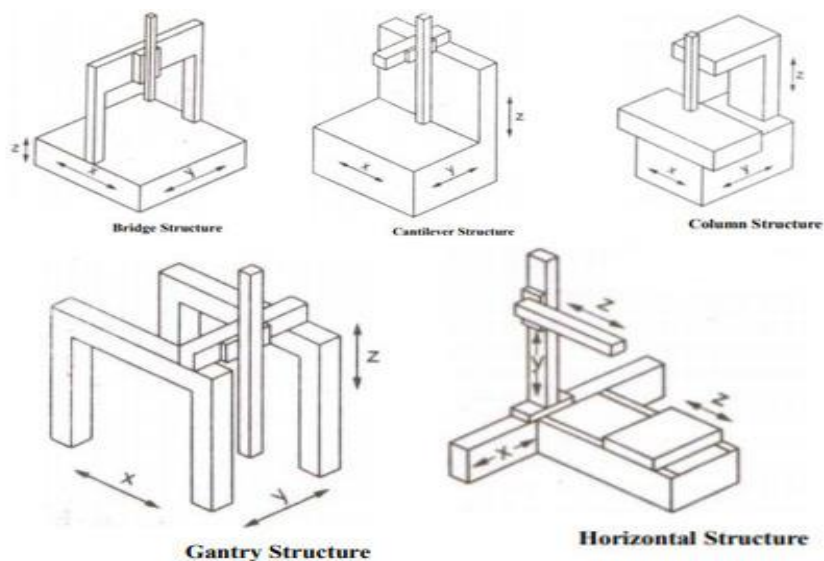
**Slika 22. Trokordinatni mjerni uređaj**

Karakteristike današnjih CCM-ova su velika preciznost upravljanja, postizanje brzih kretnji, automatizacija, istovremena kontrola površine i dimenzija. [17] Glavni nedostatak trokordinatnih mjernih uređaja sa kontaktnim ticalom naspram modernih beskontaktnih senzora je spora brzina mjerenja.

Postoji više tipova konstrukcija trokordinatnog mjernog uređaja. U ovom radu navest će se osnovnih 5 konstrukcija. Razlog postojanja različitih konstrukcija prvenstveno je da se omogući mjerenje različitih predmeta (npr. različitih dimenzija, oblika, mase), a svaka



konstrukcija ima određene prednosti i mane. Na slici 18. prikazane su sljedeće konstrukcije: mosna, konzolna, stupna, portalna, horizontalna.

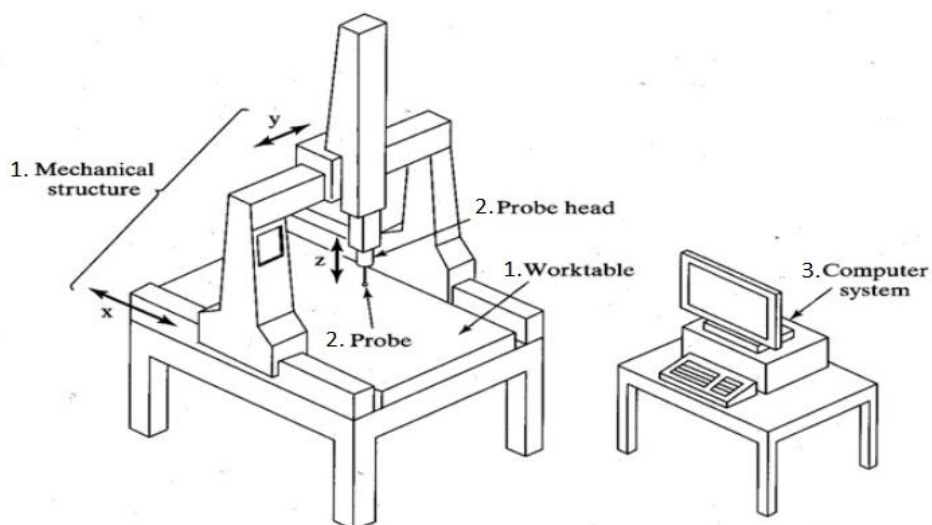


**Slika 23. Mosna, konzolna, stupna, portalna i horizontalna konstrukcija [18]**

Mosna konstrukcija je najšire korištena konstrukcija trokordinatnog mjernog uređaja.

Trokordinatni mjerni uređaj se sastoji od tri dijela:

1. Konstrukcijski dio s tri stupnja slobode gibanja
2. Sustav s ticalom
3. Sustav za pohranu i obradu podataka



**Slika 24. Dijelovi trokordinatnog mjernog uređaja [19]**

Važnu stavku u trokordinatnom mjernom uređaju ima glavni konstrukcijski dio, odnosno radna ploča. Temperaturnu izolaciju, robusnost položaja, otpor (ublažavanje) vibracija, sve osigurava ploča na kojoj se nalazi predmet mjerenja. Stariji CMM-ovi građeni su od granita ili čelika, a današnji CMM-ovi građeni su uglavnom od aluminijskih legura.

Na Z osi konstrukcije smještena je glava s ticalom. Glava ima tri stupnja slobode gibanja (rotacije) s čim cjelokupni trokordinatni mjerni uređaj postiže šest stupnjeva slobode. Ticala su najčešće mehanička ali mogu biti optička, laserska. [20]

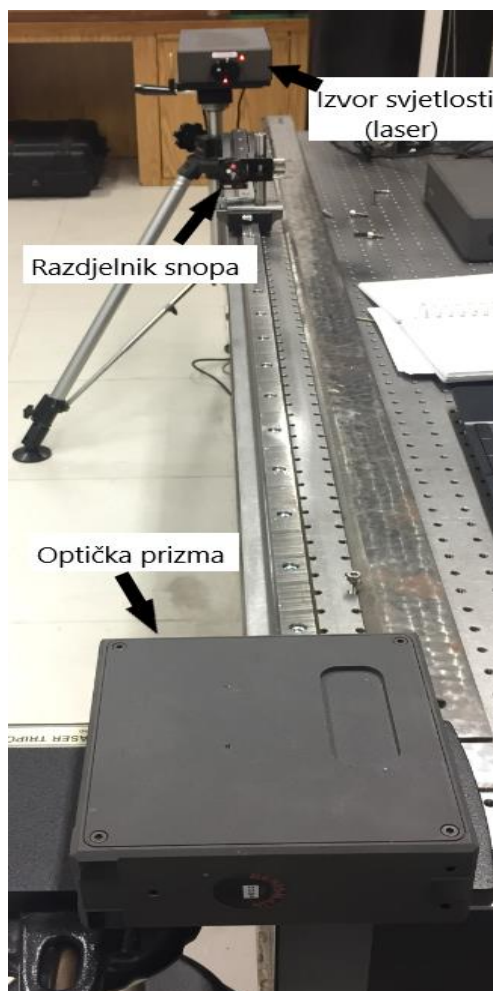


Slika 25. Mehanička ticala [21]

#### 4.4. Interferometar

Interferometrija je mjerna metoda koja koristi fenomen interferencije valova (najčešće svjetlosnih, radio i zvučnih valova). Mjerenja mogu uključivati određene karakteristike samih valova i materijala mjerenja. Osim toga, interferometrija se koristi za opisivanje tehnika koje koriste svjetlosne valove za proučavanje promjena pomaka te je važna istraživačka tehnika u području astronomije, optičkih vlakana, mjeriteljstva, optičkog mjeriteljstva, oceanografije, seizmologije, spektroskopije, kvantne mehanike, nuklearne i atomske fizike, mikrofluida, itd.. Mjerna interferometrija koristi se za umjeravanje i mehaničku kontrolu pokreta preciznih alatnih strojeva.[22],[23].

Koristeći dva svjetlosna izvora (obično razdvajanjem jednog snopa u dva) može se stvoriti uzorak interferencije kada se te dvije zrake superponiraju. Vrlo je kratka valna duljina vidljivog spektra svjetla zbog čega se mogu dogoditi male promjene u razlikama optičkih puteva (prijeđena udaljenost) između dvije zrake (jer je razlika nezamjetna), stoga je optička interferometrija vrijedna mjerna tehnika više od stotinu godina. Točnost je kasnije poboljšana izumom lasera. Osnovne principe rada interferometra utemeljio je Albert A. Michelson napravivši prvi interferometar i demonstriravši njegov rad. [22]



Slika 26. Interferometar

#### 4.4.1. Osnovni princip rada interferometra

Michelson-ov interferometar sastoji se od razdjelnika snopa svjetlosne zrake i dva zrcala. Kada zraka svjetlosti prođe kroz razdjelnik, zraka se razdvoji u dva dijela s različitim optičkim putevima (jedna je usmjerena u zrcalo 1, a druga u zrcalo 2). Nakon što se zrake reflektiraju sa zrcala, snopovi zraka se ponovno spoje na razdjelniku snopa svjetlosti prije dolaska na detektor. Razlika putanja tih dviju zraka uzrokuje faznu razliku koja stvara interferencijski uzorak. Taj uzorak analizira detektor kako bi se procijenile karakteristike vala, svojstva materijala ili pomak jednog od zrcala (ovisno o tome za koje mjerenje je korišten interferometar). [22]

## 4.5. Autokolimator

Autokolimator je beskontaktni optički instrument koji se koristi za mjerenje malih kutova s vrlo visokom osjetljivošću. Kao takav, autokolimator ima širok raspon primjena, uključujući precizno poravnavanje, detekciju kutnog pomaka, provjeru standarda kuta i kutno praćenje tijekom dužeg razdoblja. [24]

Autokolimatori se mogu podijeliti u tri skupine: [25]

1. Vizualni ili konvencionalni autokolimator
2. Digitalni autokolimator
3. Laserski autokolimator



Slika 27. Autokolimator

### 4.5.1. Princip rada autokolimatora

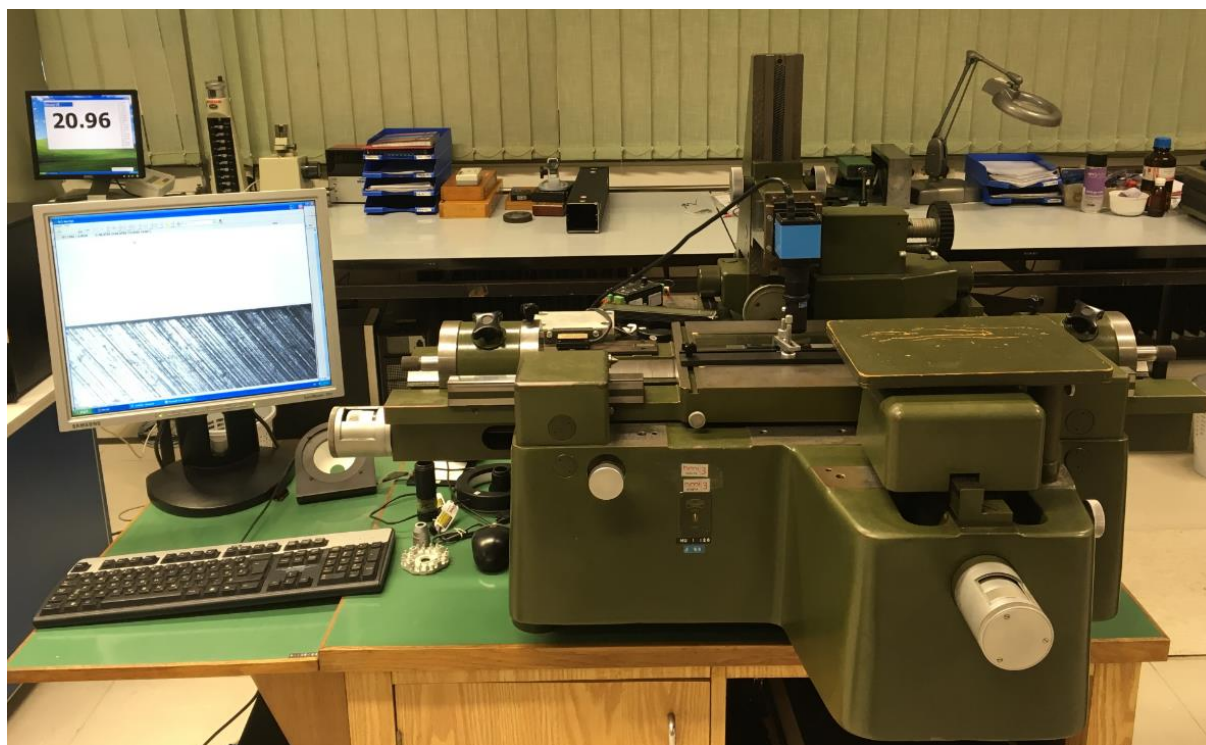
Autokolimator projicira snop kolimiranog svjetla. Vanjski reflektor reflektira sve ili dio snopa natrag u instrument gdje je snop usmjeren i detektiran fotodetektorom. Autokolimator mjeri odstupanje između emitiranog snopa i reflektirane zrake. Budući da

autokolimator koristi svjetlo za mjerenje kutova, nikada ne dolazi u kontakt s ispitivanom površinom. [24]

Osjetljivost autokolimatora ovisi o fokalnoj duljini leće objektiva. Što je fokalna duljina duža, to će biti veći linearni pomak za određeni nagib ravninskog reflektora. Ipak, maksimalni nagib reflektora koji se može prilagoditi zbog toga je smanjen, stoga postoji kompromis između osjetljivosti i mjernog raspona. [25]

#### 4.6. Alatni mikroskop

Alatni mikroskop je najrašireniji optičko-mehanički višenamjenski mjerni uređaj koji se koristi za mjerenje i kontrolu predmeta malih dimenzija koje zahtijevaju beskontaktna mjerenja, slika 28. Ova metoda koristi se u strojarskoj industriji, industriji elektroničkih dijelova, zrakoplovnoj industriji i raznim mjerenjima. Može se koristiti za mjerenje veličine, oblika, kuta i položaja svih komponenti unutar mjernog područja. Na alatnom mikroskopu mogu se obavljati mjerenja kutova i duljine. [29],[30]



Slika 28. Alatni mikroskop

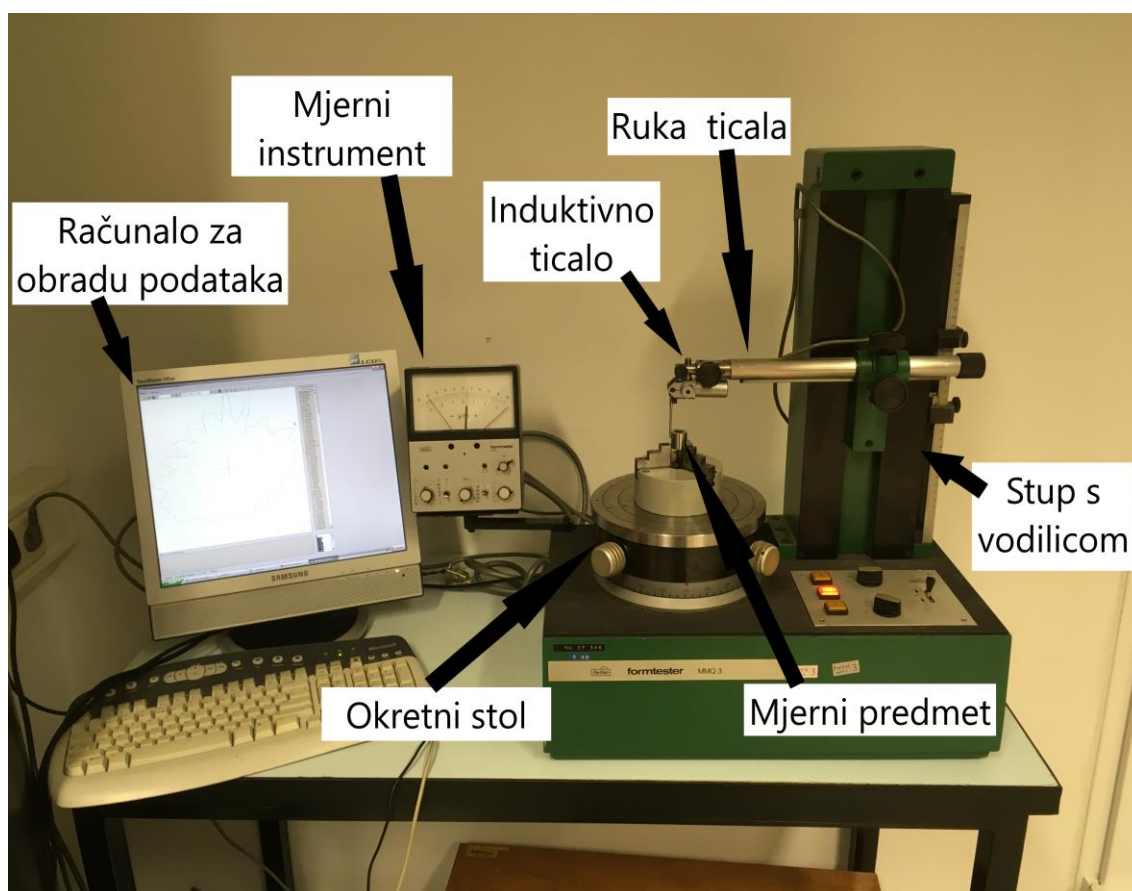
Alatni mikroskop namijenjen je za izvođenje sljedećih mjernih zadataka:

- mjerenje linearnih udaljenosti
- mjerenje nagiba i kutova navoja

- mjerenje rubova alata
- mjerenje promjera provrta
- ispitivanje tolerancija oblika i položaja
- kontrola podjela na mjernim libelama i zupčastim letvama
- mjerenje i kontrola dužine i kutova na bregastim i koljenastim vratilima [29],[30].

#### 4.7. Mjerenje odstupanja od kružnosti

Odstupanje od pravocrtnosti nije jedina tolerancija oblika koje se može mjeriti metodom separacije pogreške, s njom se također može mjeriti odstupanje od kružnosti. U ovom radu mjerit će se odstupanje od kružnosti reverzibilnom metodom separacije pogreške na Mahr-ovom uređaju modela MMQ 3 formtester. To je metoda ispitivanja kružnosti s vanjskom mjernom referencom na tipu rotirajućeg stola, slika 29.



Slika 29. Sustav Mahr MMQ 3

Mahr MMQ 3 jedan je od „najraširenijih uređaja za mjerenje kružnosti u svijetu. Unatoč odličnoj mehaničkoj stabilnosti i izuzetno točnoj vrtnji okretnog stola, uređaj nije podržan s modernim metodama koje se dana koriste u području mjerenja kružnosti. U Laboratoriju je razvijen i izrađen program za analizu mjernih podataka s modulima za izračun odstupanja od kružnosti, digitalnu filtraciju signala kružnosti, harmonijsku analizu, manipulaciju s profilom mjerenja i izradu izvješća o mjerenju.“ [31] Odstupanje od kružnosti može se mjeriti u rasponu mjernog područja od 3  $\mu\text{m}$  do 1000  $\mu\text{m}$  koje se definira u računalnom programu isto kao i broj točaka mjerenja.

Uređaj Mahr MMQ3 sastoji se od:

- okretnog stola
- stupa s vodilicom
- ruke ticala
- induktivnog ticala
- analognog pojačala
- računala s posebnim programom za obradu podataka

Računalni program sadrži numeričke metode za analizu odstupanja od kružnosti rezultata mjerenja te se u računalnom programu odabire prema kojoj će se numeričkoj metodi analizirati podaci mjerenja i shodno tome koji će polarni dijagram program nacrtati. Numeričke metode koje se mogu odabrati su sljedeće:

- Kružnica najmanjih kvadrata (*eng.* least squares circle -LSC)
- Najmanja kružna zona (*eng.* minimum zone circle – MZC)
- Najmanja opisana kružnica (*eng.* minimum circumscribed circle – MCC)
- Najveća upisana kružnica (*eng.* maximum inscribed circle MIC)

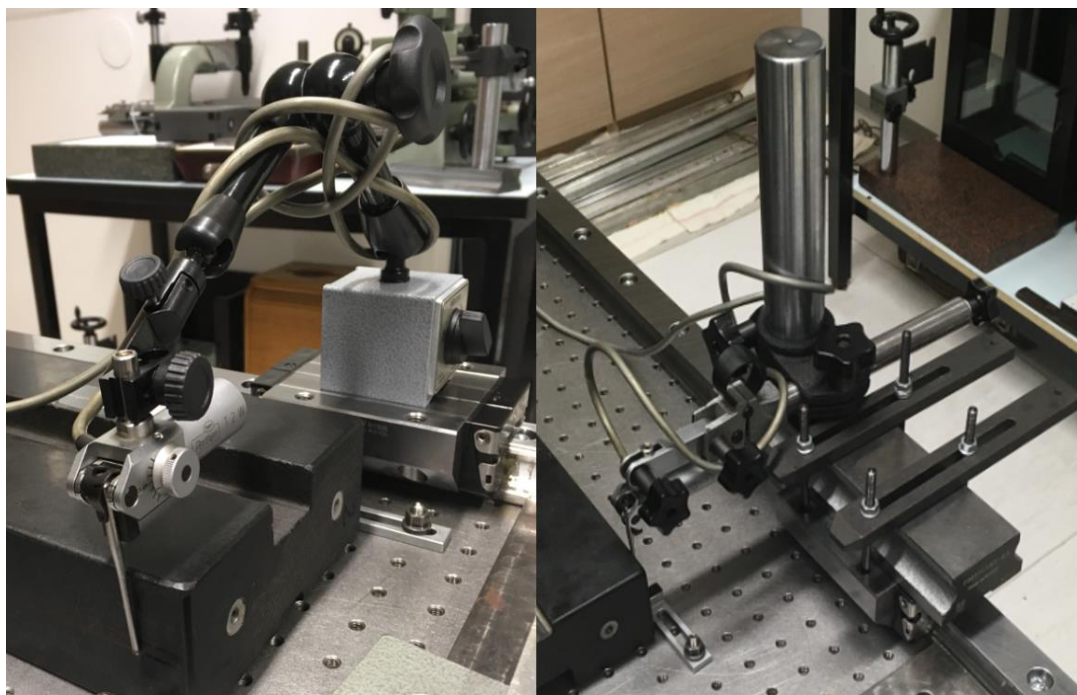
## 5. REZULTATI MJERENJA

U ovom poglavlju prikazana je primjenjivost reverzibilne metode separacije pogreške za mjerenje odstupanja od pravocrtnosti i kružnosti s različitim mjernim metodama.

Sva mjerenja napravljena su u Laboratoriju za precizna mjerenja dužina na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u Zagrebu. Laboratoriji sadrži automatiziran sustav za hlađenje i grijanje, odnosno za reguliranje i održavanje željene temperature. Temperatura u laboratorijskoj prostoriji za vrijeme svih mjerenja iznosila je 20 °C ( $\pm 1$  °C). Sva mjerenja osim mjerenja na alatnom mikroskopu i mjerenja kružnosti obavljena su na stolu koji ima zračne jastuke čime su izolirani utjecaji vibracije tla.

### 5.1. Stabilnost induktivnog ticala

U ovom mjerenju ispitivana je stabilnost ticala, odnosno stabilnost ticala dok miruje u zadanoj točki na dva različita držača. Korištena su dva prihвата: fleksibilni magnetni držač i kruti držač, slika 30. Kod mjerenja stabilnosti krutog držača prikazan je utjecaj promjene temperature na stabilnost ticala.



Slika 30. Fleksibilni magnetni držač i kruti držač



### 5.1.1. Stabilnost ticala na fleksibilnom magnetnom držaču

Mjerno područje analognog mjernog instrumenta postavljeno je na 10  $\mu\text{m}$ . Za vrijeme mjerenja mjeritelj je mijenjao svoju poziciju u odnosu na poziciju mjernog ticala. Mjerenje je napravljeno u laboratorijskoj prostoriji.

#### 5.1.1.1. Rezultati mjerenja na fleksibilnom magnetnom držaču

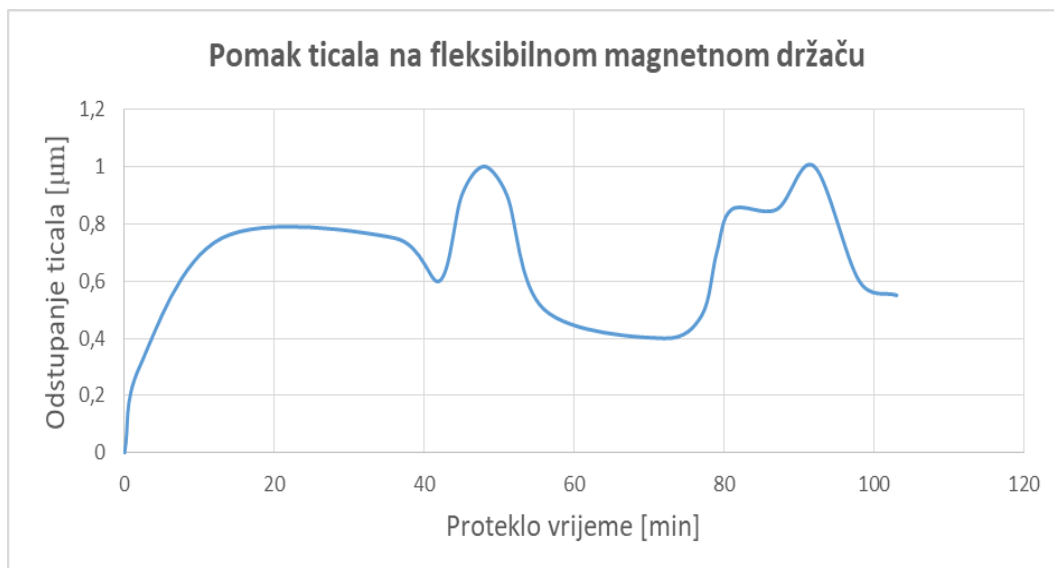
Podaci mjerenja sadrže vrijeme mjerenja i pomak pozicije ticala na fleksibilnom magnetnom držaču kao što je prikazani u tablici 1. Većinu vremena mjerenja mjeritelj je bio u neposrednoj blizini ticala. Najveći pomak ticala dogodio se u prvom dijelu mjerenja odnosno nakon postavljanja ticala kad je izmjeren pomak ticala od 1  $\mu\text{m}$ . Vidljivo je da se kasnije pomak ticala stabilizirao na  $\pm 0,3$   $\mu\text{m}$ .

**Tablica 1. Stabilnost ticala na fleksibilnom magnetnom držaču**

Fleksibilni magnetni držač		
Vrijeme [h]	Pomak ticala [ $\mu\text{m}$ ]	Pomak vremena [min]
9:31	0	0
9:33	0,3	2
9:42	0,75	13
10:05	0,75	36
10:11	0,6	42
10:14	0,9	45
10:17	1	48
10:21	0,9	51
10:26	0,5	56
10:40	0,4	72
10:45	0,48	77
10:47	0,7	79
10:49	0,85	81
10:55	0,85	87
11:00	1	92
11:06	0,6	98
11:11	0,55	103

Na slici 31. prikazan je pomak ticala s obzirom na proteklo vrijeme, ali nije naznačena promjena položaja mjeritelja u prostoru. Prema slici 31. nakon stabilizacije sustava maksimalna razlika vršnih vrijednosti iznosi 0,6  $\mu\text{m}$ . Znamo da je najveća promjena nastala

upravo zbog toga što je mjeritelj promijenio poziciju u vremenskom periodu od 50-te do 70-te minute mjerenja. Zato će se u idućem mjerenju kontrolirati prisutnost mjeritelja i utjecaj temperature na stabilnost ticala kako bi saznali koliki utjecaj ima promjena temperature na stabilnost ticala.

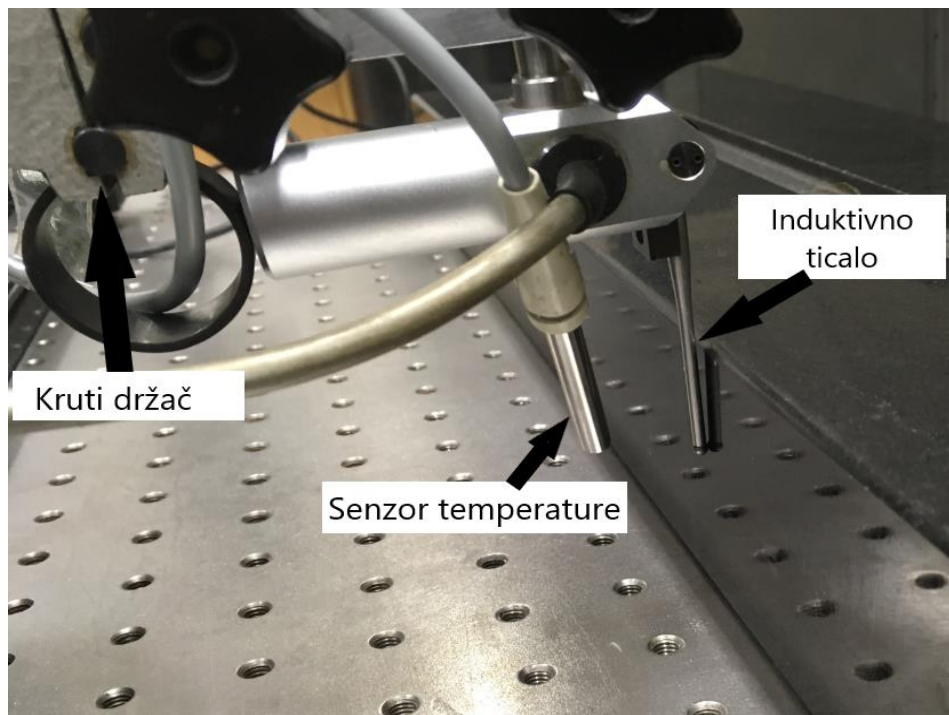


**Slika 31. Pomak pozicije ticala na fleksibilnom magnetnom držaču**

Iz priloženog mjerenja može se zaključiti da prilikom postavljanja sustava s fleksibilnim magnetnim držačem potrebno napraviti pauzu od 20 minuta prije početka mjerenja kako bi se sustav stabilizirao i kako bi nestabilnost ticala manje utjecala na rezultate mjerenja. Poželjno je da mjeritelj zauzme položaj mjerenja za vrijeme pauze kako bi se smanjio utjecaj mjeritelja u prostoru na pomak pozicije ticala.

### 5.1.2. Stabilnost ticala na krutom držaču

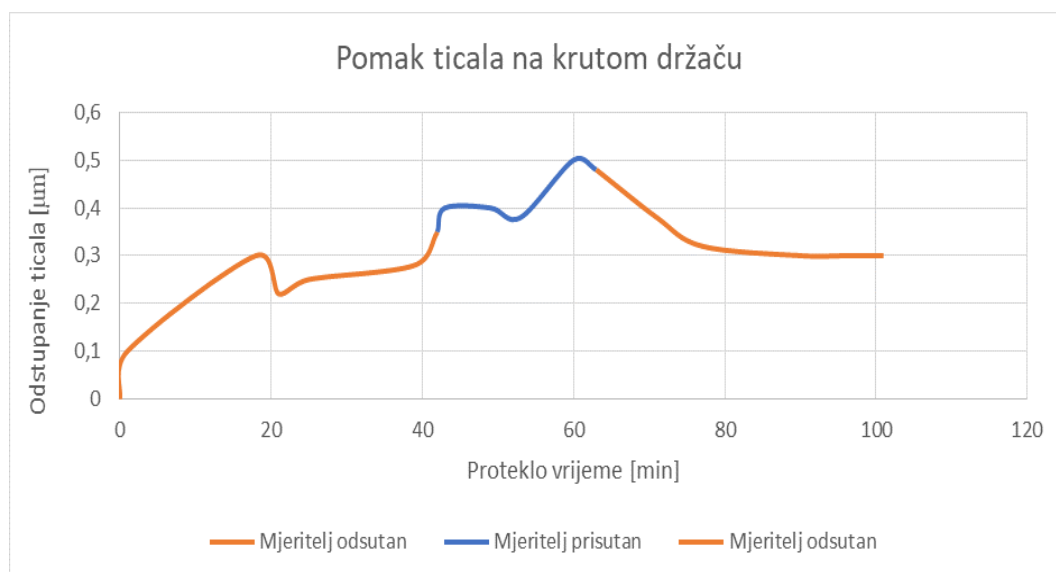
Mjerno područje analognog mjernog instrumenta postavljeno je na 10 µm. Najveći dio vremena mjerenja mjeritelj je proveo u neposrednoj blizini induktivnog ticala. Prisutnost mjeritelja u neposrednoj blizini ticala povisuje toplinu oko mjernog ticala, zbog čega je u ovom mjerenju stabilnosti ticala na krutom držaču također mjerena temperatura u neposrednoj blizini ticala kako bi saznali utjecaj promjene temperature na promjenu pozicije ticala. Senzor temperature nalazi se u neposrednoj blizini mjernog ticala, a mjerenje je napravljeno u laboratorijskoj prostoriji, slika 32.



Slika 32. Senzor temperature na krutom držaču

#### 5.1.2.1. Rezultati mjerenja na krutom držaču

U tablici 2. prikazano je vrijeme mjerenja, pomak pozicije ticala i temperatura u okolini ticala. Ovo mjerenje sadrži prikaz prisutnosti mjeritelja s obzirom na vrijeme mjerenja što se vidi u tablici 2, slika 33. i slika 34.



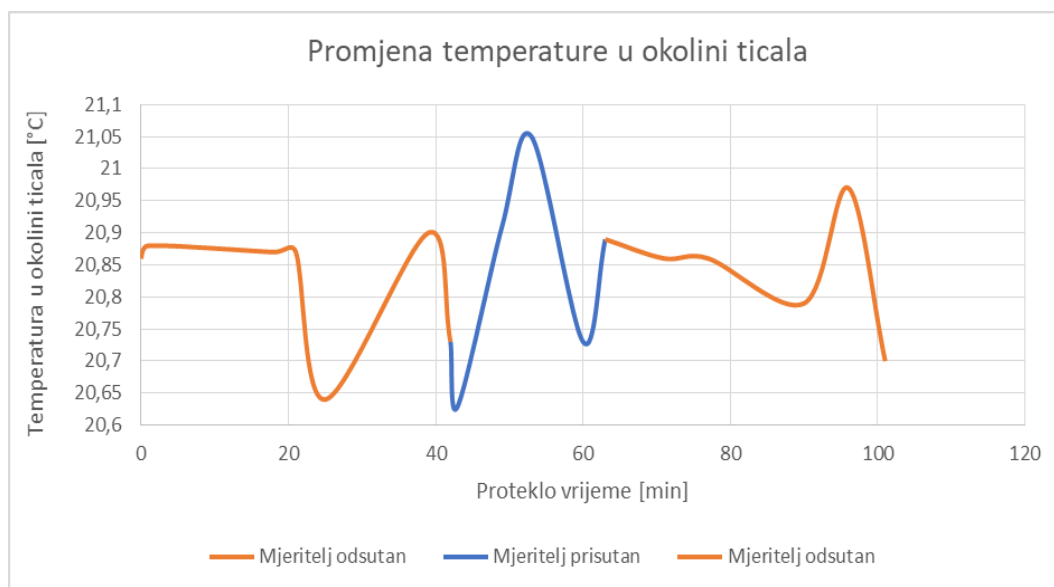
Slika 33. Pomak pozicije ticala na krutom držaču

Tablica 2 Stabilnost ticala na krutom držaču

Kruti držač			
Vrijeme [h]	Pozicija ticala [ $\mu\text{m}$ ]	Pomak vremena [min]	Temperatura $^{\circ}\text{C}$
Mjeritelj odsutan			
10:51	0	0	20,86
10:52	0,1	1	20,88
11:09	0,3	18	20,87
11:12	0,22	21	20,87
11:16	0,25	25	20,64
11:30	0,28	39	20,9
11:33	0,35	42	20,73
Mjeritelj prisutan			
11:34	0,4	43	20,63
11:40	0,4	49	20,91
11:44	0,38	53	21,05
11:51	0,5	60	20,73
11:54	0,48	63	20,89
Mjeritelj odsutan			
12:02	0,38	71	20,86
12:08	0,32	77	20,86
12:21	0,3	90	20,79
12:27	0,3	96	20,97
12:32	0,3	101	20,7

Iz rezultata mjerenja može se zaključiti da se vrijednost temperature jako malo mijenja te da prisustvo mjeritelja neznatno utječe na promjenu vrijednosti temperature, iako ima utjecaja na pomaka ticala. Pomak ticala se 15 minuta nakon početka mjerenja stabilizira na  $\pm 0,1 \mu\text{m}$ . Dolaskom mjeritelja ticalo se pomaklo za  $+0,1 \mu\text{m}$  i ponovno stabiliziralo na  $\pm 0,1 \mu\text{m}$ . Odsutnošću mjeritelja ticalo se pomaklo za  $-0,1 \mu\text{m}$  i stabiliziralo na  $\pm 0,1 \mu\text{m}$ . Na slici 33. prikazan je pomak ticala s obzirom na proteklo vrijeme i označena je promjena položaja mjeritelja u prostoru.

Na slici 34. prikazana je promjena temperature s obzirom na proteklo vrijeme i označena je promjena položaja mjeritelja u prostoru.



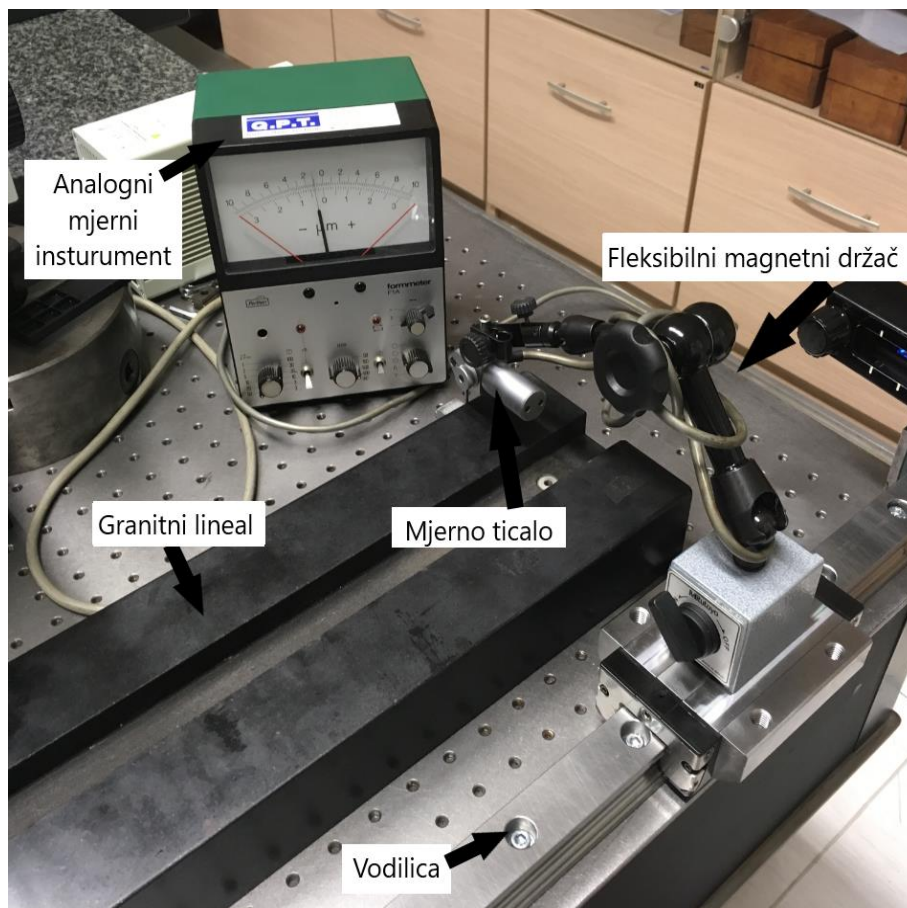
**Slika 34. Promjena temperature na krutom držaču**

Iz mjerenja se može zaključiti da je potrebno napraviti pauzu barem 15 minuta nakon postavljanja ticala na krutom držaču kako bi se ticalo stabiliziralo i kako bi se postigla stabilnost ticala od  $\pm 0,1 \mu\text{m}$ . Vidljiv je utjecaj mjeritelja na stabilnost ticala unatoč tome što miruje.

Ako usporedimo rezultate mjerenja fleksibilnog magnetnog držača i krutog držača može se zaključiti da je kruti držač stabilniji te da mjeritelj ima manji utjecaj na stabilnost induktivnog ticala zbog čega će se u daljnjim mjerenjima koristiti kruti držač kao referentni primjer.

## 5.2. Mjerenje odstupanja od pravocrtnosti reverzibilnom metodom separacije pogreške na fleksibilnom magnetnom držaču

Mjerenje odstupanja od pravocrtnosti reverzibilnom metodom separacije pogreške napravljeno je s induktivnim ticalom koje je postavljeno na fleksibilni magnetni držač pri čemu je mjereno odstupanje od pravocrtnosti granitnog lineala. Cilj ovog mjerenja je odrediti odstupanje od pravocrtnosti vodilice i odstupanje od pravocrtnosti granitnog lineala. Mjerni sustav prikazan je na slici 35.



**Slika 35. Mjerni sustav s fleksibilnim magnetnim držačem**

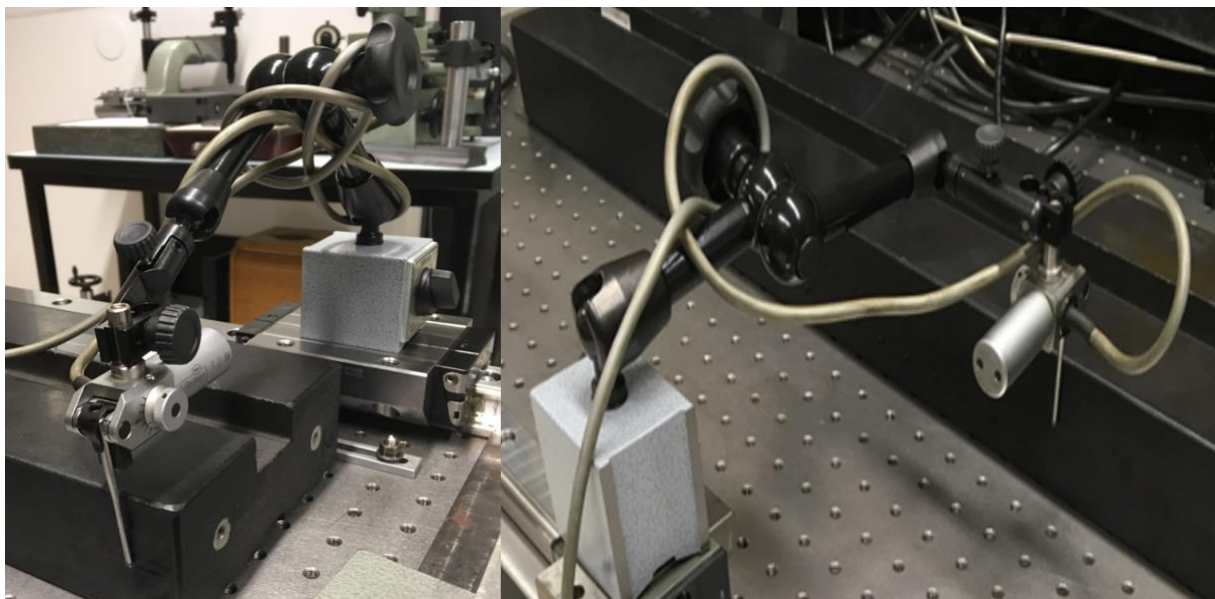
Za potrebe ovog mjerenja korišteno je induktivno ticalo marke Mahr Perhen T2W, analogni mjerni instrument, fleksibilni magnetsni držač, granitni lineal i stege za fiksiranje fleksibilnog magnetnog držača.

Mjerno područje analognog mjernog instrumenta postavljeno je na  $30\ \mu\text{m}$  i nije moglo biti manje zato što je maksimalna pogreška pravocrtности vodilice veća od  $10\ \mu\text{m}$ . Iduća niža skala mjernog područja na analognom instrumentu je  $10\ \mu\text{m}$  što znači da se rezultat mjerenja ne bi nalazio u mjernom području instrumenta. Na granitnom linealu markerom su ručno ucrtane točke mjerenja svakih  $50\ \text{mm}$  prema kojima se ručno pozicioniralo ticalo.

### 5.2.1. Rezultati mjerenja

Prije početka mjerenja fleksibilni magnetni držač postavljen je na pokretnu vodilicu i pričvršćen magnetnom silom za vodilicu. Također je granitni lineal pričvršćen tako da se osigura od neželjenih pomaka.

U prvom mjeranju orijentacija sustava je kao na slici 36. lijevo, a mjerjenje se izvršilo u četiri uzastopna ponavljanja prikazana u Tablica 3.



**Slika 36. Orijentacije fleksibilne magnetnog držača, početna orijentacija (lijevo) i reverzna orijentacija (desno)**

**Tablica 3. Mjerenje fleksibilnim magnetnim držačem**

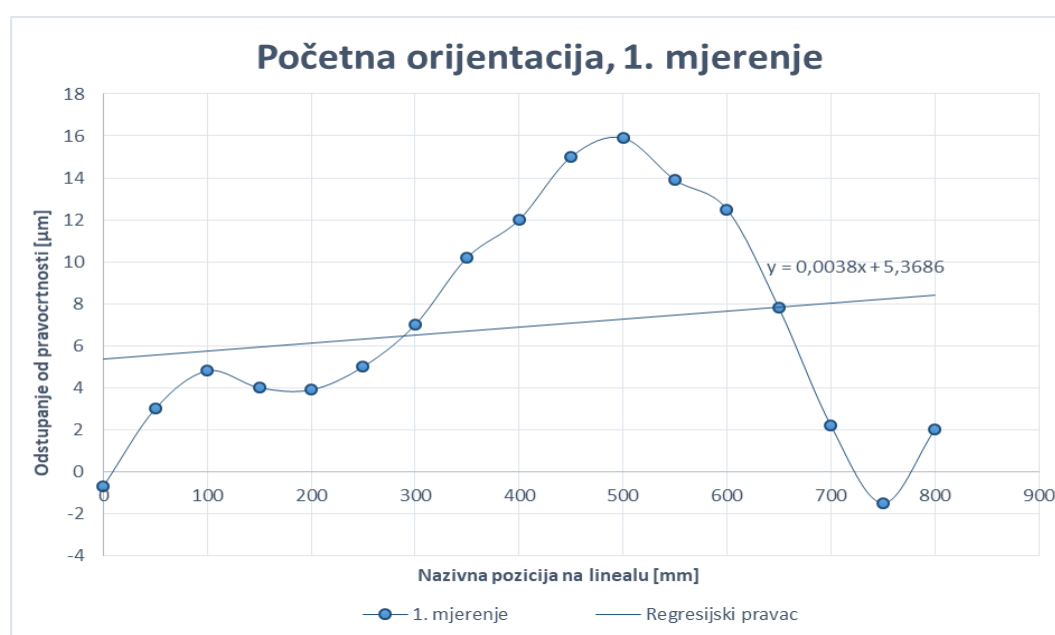
Pozicija mjerenja [mm]	1. Mjerenje	2. Mjerenje	3. Mjerenje	4. Mjerenje
0	-0,7	0	0,5	1
50	3	4	4	4,2
100	4,8	2,2	5	5
150	4	4,2	4,2	4,8
200	3,9	3,9	1,5	3,8
250	5	3,8	2,8	4,7
300	7	8	7,2	7,2
350	10,2	11	11,5	11,5
400	12	12	13,5	13,8
450	15	16,1	14,5	15,6
500	15,9	16,5	16,5	16,5
550	13,9	15,2	15,2	15,7
600	12,5	10,9	12,5	13
650	7,8	7,8	8	8,5
700	2,2	2	0	2
750	-1,5	-1,8	-1,8	-1,5
800	2	2	2,2	1,3

Nakon mjerenja potrebno je izračunati vrijednosti nagiba pravca i odsjeka pravca najmanjih kvadrata za svako mjerenje, tablica 4.

**Tablica 4. Nagib pravca i odsječak pravca za mjerenja fleksibilnim magnetnim držačem**

	1. Mjerenje	2. Mjerenje	3. Mjerenje	4. Mjerenje
Nagib pravca:	0,003784	0,003750	0,003176	0,002721
Odsječak pravca:	5,368627	5,429412	5,629412	6,388235

Na slici 37. prikazan je dijagram početne orijentacije 1. mjerenja iz tablice 3. te je označen regresijski pravac.



**Slika 37. Odstupanje od pravocrtnosti - početna orijentacija 1. mjerenje**

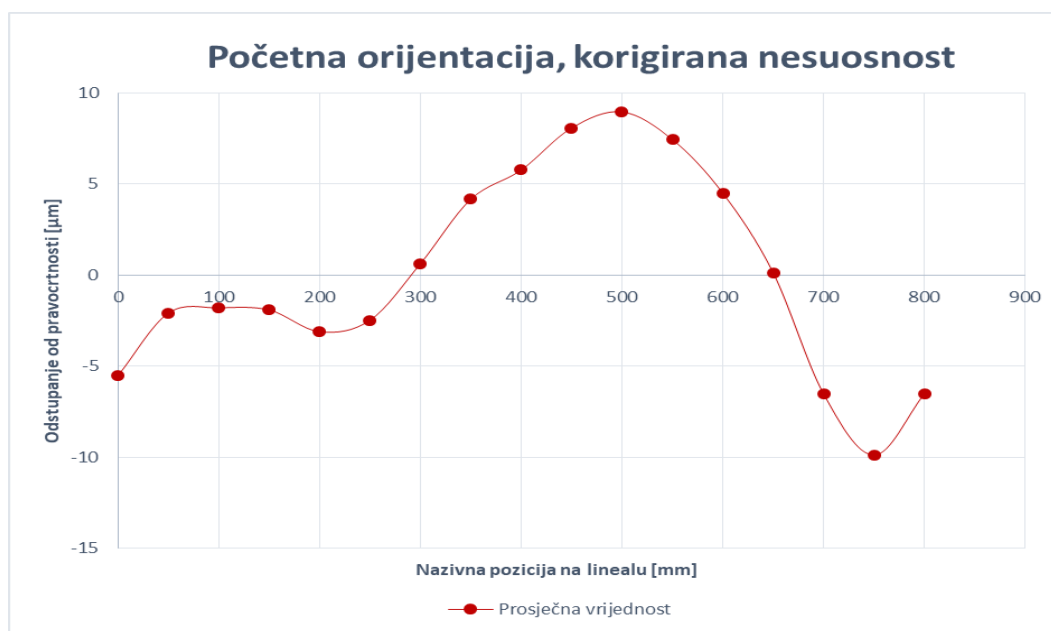
Unatoč fiksiranju mjernog ticala i granitnog lineala, neizbježni su mali pomaci i male nesuosnosti. Izmjerenim podacima potrebno je eliminirati nesuosnost primjenom metode najmanjih kvadrata. Dostupni su svi elementi da se matematičkim putem može primjeniti metoda najmanjih kvadrata prema formuli (7) i prosječna vrijednost svih pozicija mjerenja iz kojih će se u daljnjem dijelu odrediti odstupanje od pravocrtnosti granitnog lineala ( pogreška pravocrtnosti ) i odstupanje od pravocrtnosti vodilice ( pogreška vođenja ), tablica 5.

Slika 38. prikazuje dijagram korigirane nesuosnosti prosječnih vrijednosti početne orijentacije dobivenih provedbom metode najmanjih kvadrata iz tablice 5.



Tablica 5. Metoda najmanjih kvadrata za mjerenja fleksibilnim magnetnim držačem

Pozicija mjerenja [mm]	1. Mjerenje	2. Mjerenje	3. Mjerenje	4. Mjerenje	Prosječna vrijednost
0	-6,07	-5,43	-5,13	-5,39	-5,50
50	-2,56	-1,62	-1,79	-2,32	-2,07
100	-0,95	-3,60	-0,95	-1,66	-1,79
150	-1,94	-1,79	-1,91	-2,00	-1,91
200	-2,23	-2,28	-4,76	-3,13	-3,10
250	-1,31	-2,57	-3,62	-2,37	-2,47
300	0,50	1,45	0,62	0,00	0,64
350	3,51	4,26	4,76	4,16	4,17
400	5,12	5,07	6,60	6,32	5,78
450	7,93	8,98	7,44	7,99	8,09
500	8,64	9,20	9,28	8,75	8,97
550	6,45	7,71	7,82	7,82	7,45
600	4,86	3,22	4,96	4,98	4,51
650	-0,03	-0,07	0,31	0,34	0,14
700	-5,82	-6,05	-7,85	-6,29	-6,50
750	-9,71	-10,04	-9,81	-9,93	-9,87
800	-6,40	-6,43	-5,97	-7,26	-6,52



Slika 38. Odstupanje od pravocrtosti - početna orijentacija, korigirana nesuosnost, prosječna vrijednost

U slučaju da ne bi primjenili reverzibilnu metodu separacije pogreške mjerenje bi bilo gotovo u ovom koraku. Prema tablici 5. raspon odstupanja od pravocrtnosti granitnog lineala iznosio bi od  $-9.9 \mu\text{m}$  do  $9.0 \mu\text{m}$  iz čega slijedi da je odstupanje od pravocrtnosti granitnog lineala s fleksibilnim magnetnim držačem iznosa  $18.8 \mu\text{m}$

Kako bi se mogla provesti reverzibilna metoda separacije pogreške potrebno je granitni lineal i mjerno ticalo zarotirati kao na slici 28. Prema tome granitni lineal zarotiran je za  $180^\circ$  i pričvršćen, a mjerno ticalo je zadržalo istu orijentaciju, ali mu je promijenjena pozicija zbog pomaka granitnog lineala, primjer slika 36. Na mjernom ticalu također je promijenjen smjer mjerne sile koji je sad postavljen u suprotnom smjeru. Reverzno mjerenje obavljeno je u četiri uzastopna ponavljanja, tablica 6.

**Tablica 6. Reverzno mjerenje fleksibilnim magnetnim držačem**

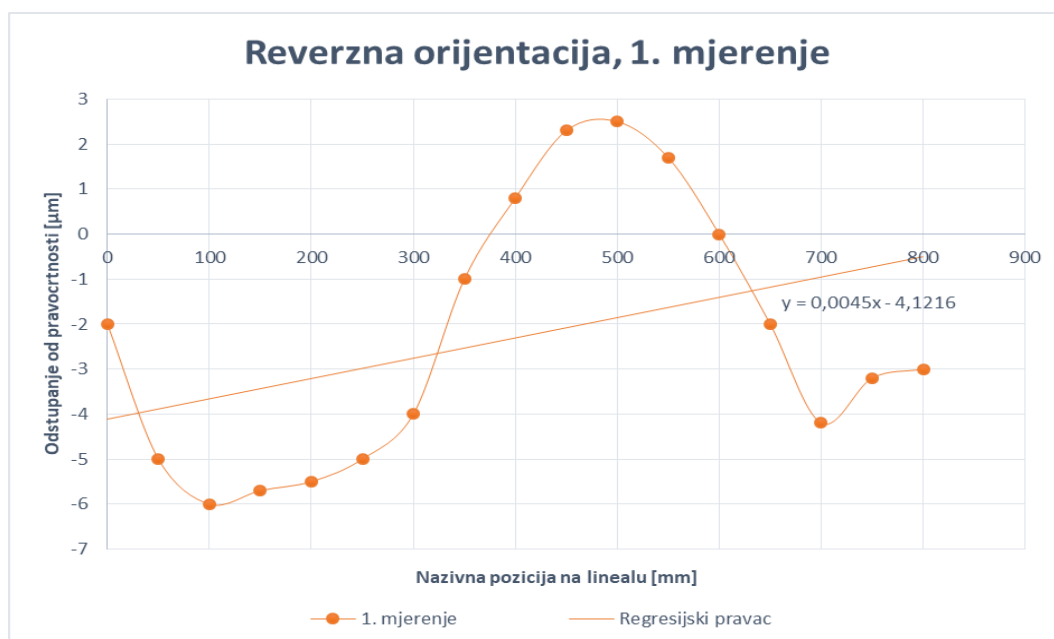
Pozicija mjerenja [mm]	1. Mjerenje	2. Mjerenje	3. Mjerenje	4. Mjerenje
0	-2	-2,8	-2	-2,7
50	-5	-5	-4	-5
100	-6	-5,5	-4,9	-5,8
150	-5,7	-5,5	-4,8	-5,2
200	-5,5	-5,5	-4,8	-5,2
250	-5	-4,7	-4	-4,7
300	-4	-3	-2,8	-3
350	-1	-1,2	-0,8	-1,2
400	0,8	0,8	2	1,2
450	2,3	2,5	3,2	3
500	2,5	2,9	4	3
550	1,7	1,5	3	2,4
600	0	0	-0,3	0
650	-2	-2	-1,5	-1,5
700	-4,2	-4,5	-3,8	-4
750	-3,2	-5,5	-5,2	-5
800	-3	-4	-3,2	-4

Zatim su izračunate vrijednosti nagiba pravca i odsječka pravca najmanjih kvadrata za svako mjerenje iz tablice 6., tablica 7.

**Tablica 7. Nagib pravca i odsječak pravca za reverzno mjerenje fleksibilnim magnetnim držačem**

	1. Mjerenje	2. Mjerenje	3. Mjerenje	4. Mjerenje
Nagib pravca:	0,004525	0,003260	0,003025	0,003784
Odsječak pravca:	-4,121569	-3,745098	-2,968627	-3,731373

Na slici 39. prikazan je dijagram reverzne orijentacije 1. mjerenja iz tablice 6. te je označen regresijski pravac.

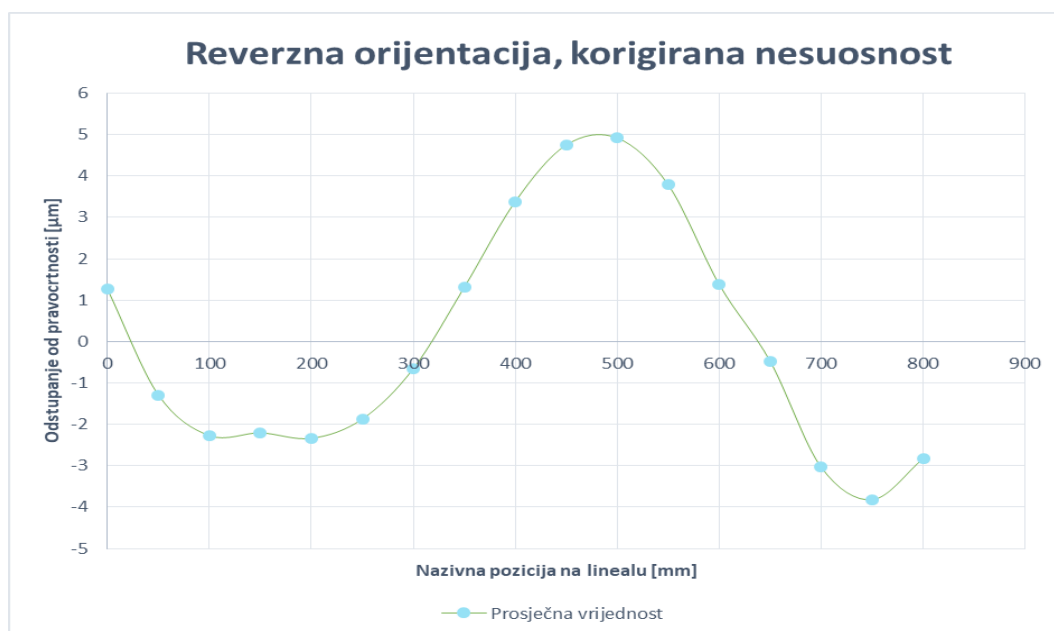


**Slika 39. Odstupanje od pravocrtosti - reverzna orijentacija, 1. mjerenje**

Dostupni su svi potrebni elementi da se može matematičkim putem primjeniti metoda najmanjih kvadrata prema formuli (7) i izračunati prosječnu vrijednost svih mjerenja tablica 8., iz kojih će se u daljnjem dijelu odrediti odstupanje od pravocrtosti granitnog lineala i odstupanje od pravocrtosti vodilice.

**Tablica 8. Metoda najmanjih kvadrata za reverzno mjerenja fleksibilnim magnetnim držačem**

Pozicija mjerenja [mm]	1. Mjerenje	2. Mjerenje	3. Mjerenje	4. Mjerenje	Prosječna vrijednost
0	2,12	0,95	0,97	1,03	1,27
50	-1,10	-1,42	-1,18	-1,46	-1,29
100	-2,33	-2,08	-2,23	-2,45	-2,27
150	-2,26	-2,24	-2,29	-2,04	-2,21
200	-2,28	-2,41	-2,44	-2,23	-2,34
250	-2,01	-1,77	-1,79	-1,91	-1,87
300	-1,24	-0,23	-0,74	-0,40	-0,65
350	1,54	1,40	1,11	1,21	1,31
400	3,11	3,24	3,76	3,42	3,38
450	4,39	4,78	4,81	5,03	4,75
500	4,36	5,02	5,46	4,84	4,92
550	3,33	3,45	4,31	4,05	3,79
600	1,41	1,79	0,85	1,46	1,38
650	-0,82	-0,37	-0,50	-0,23	-0,48
700	-3,25	-3,04	-2,95	-2,92	-3,04
750	-2,47	-4,20	-4,50	-4,11	-3,82
800	-2,50	-2,86	-2,65	-3,30	-2,83

**Slika 40. Odstupanje od pravocrtnosti - reverzna orijentacija, korigirana nesuosnost, prosječna vrijednost**

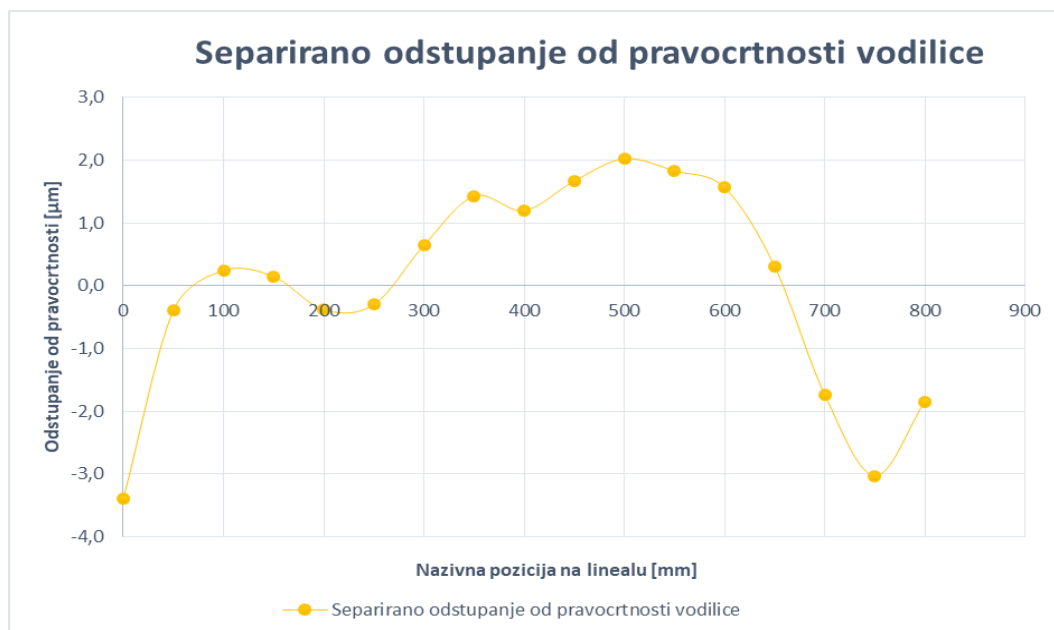
Slika 40. prikazuje dijagram korigirane nesuosnosti prosječnih vrijednosti za reverznu orijentaciju dobivenih provedbom metode najmanjih kvadrata iz tablice 8.

Sada se mogu primijeniti jednadžbe 10. i 11., a rezultat je odstupanje od pravocrtosti vodilice i odstupanje od pravocrtosti granitnog lineala, tablici 9.

**Tablica 9. Pogreške vođenja i odstupanja od pravocrtosti granitnog lineala reverzibilnom metodom separacije pogreške s fleksibilnim magnetnim držačem**

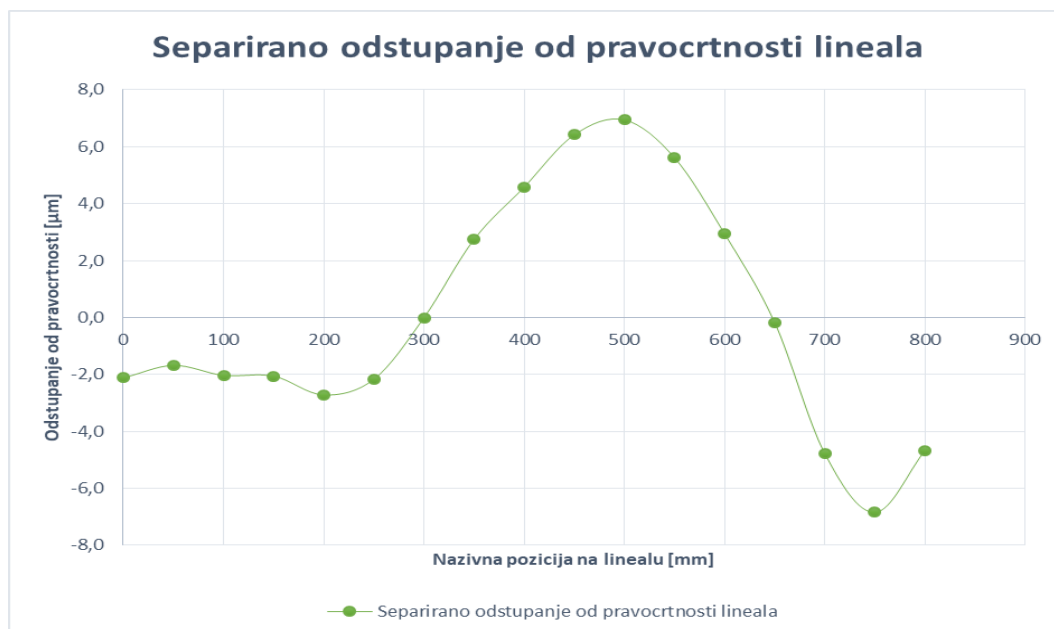
Pozicija mjerenja [mm]	Pogreška vođenja [ $\mu\text{m}$ ]	Pogreška pravocrtosti [ $\mu\text{m}$ ]
0	-3,4	-2,1
50	-0,4	-1,7
100	0,2	-2,0
150	0,1	-2,1
200	-0,4	-2,7
250	-0,3	-2,2
300	0,6	0,0
350	1,4	2,7
400	1,2	4,6
450	1,7	6,4
500	2,0	6,9
550	1,8	5,6
600	1,6	2,9
650	0,3	-0,2
700	-1,7	-4,8
750	-3,0	-6,8
800	-1,8	-4,7

Prema rezultatima iz tablice 9. raspon pogreške vođenja iznosi od  $-3,4 \mu\text{m}$  do  $2,0 \mu\text{m}$ , što znači da odstupanje od pravocrtosti vodilice reverzibilnom metodom separacije pogreške na fleksibilnom magnetnom držaču iznosi  $5,4 \mu\text{m}$ , slika 41.



Slika 41. Separirano odstupanje od pravocrtnosti vodilice

Raspon odstupanja od pravocrtnosti granitnog lineala iznosi od  $-6,8 \mu\text{m}$  do  $6,9 \mu\text{m}$ , što znači da odstupanje od pravocrtnosti granitnog lineala reverzibilnom metodom separacije pogreške na fleksibilnom magnetnom držaču iznosi  $13,8 \mu\text{m}$ , slika 42.



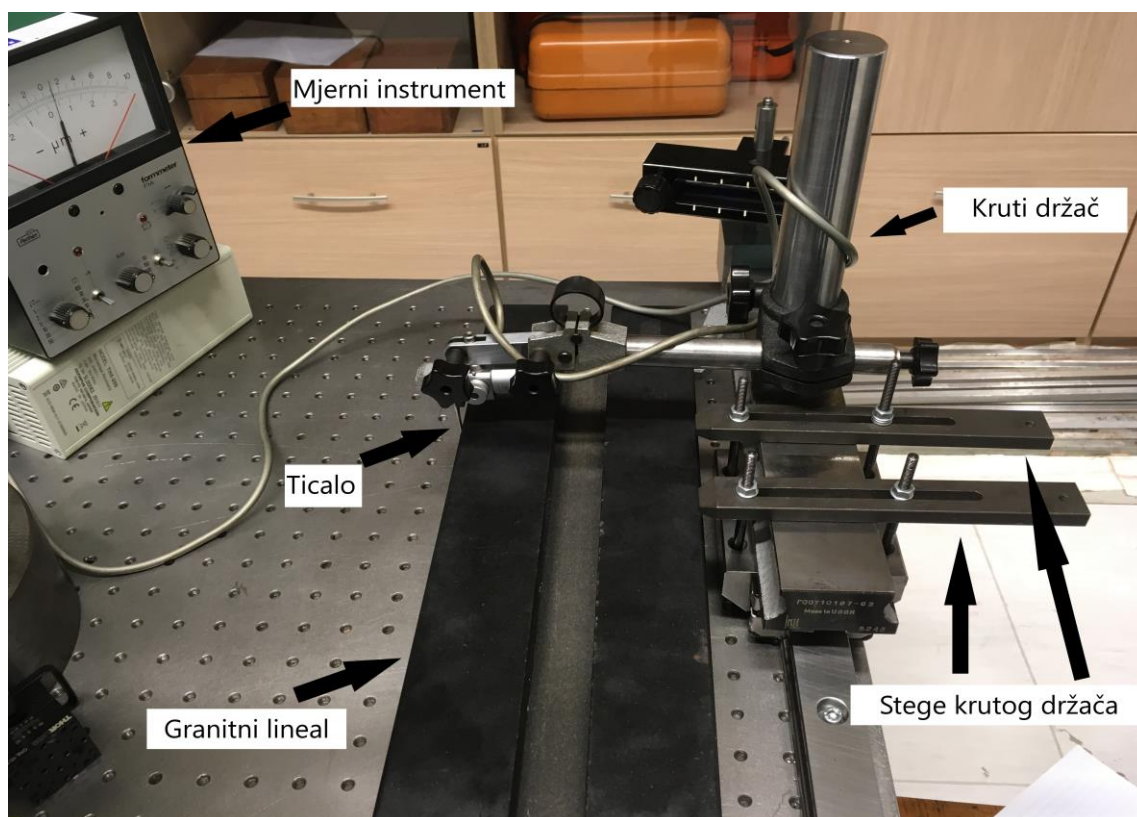
Slika 42. Separirano odstupanje od pravocrtnosti granitnog lineala

### 5.3. Mjerenje odstupanja od pravocrtnosti reverzibilnom metodom separacije pogreške na krutom držaču

Mjerenje pogreške pravocrtnosti reverzibilnom metodom separacije pogreške napravljeno je s istim induktivnim ticalom pri čemu je zamijenjen fleksibilni magnetni držač s krutim držačem. Cilj ovog mjerenja je odrediti odstupanje od pravocrtnosti vodilice i odstupanje od pravocrtnosti granitnog lineala. Mjerni sustav prikazan je na slici 43.

Za potrebe ovog mjerenja korišteno je induktivno ticalo marke Mahr Perhen T2W, analogni mjerni instrument, kruti držač ticala, granitni lineal i stega za fiksiranje krutog držača.

Mjerno područje analognog mjernog instrumenta postavljeno je na  $30\ \mu\text{m}$  i nije moglo biti manje zato što je maksimalna pogreška pravocrtnosti vodilice veća od  $10\ \mu\text{m}$ . Iduća niža skala mjernog područja na analognom instrumentu je  $10\ \mu\text{m}$  što znači da se rezultat mjerenja ne bi nalazio u mjernom području instrumenta. Na granitnom linealu markerom su ručno ucertane točke mjerenja svakih  $50\ \text{mm}$  prema kojima se ručno pozicioniralo ticalo i mjerilo.



Slika 43. Mjerni sustav s krutim držačem

### 5.3.1. Mjerenje i rezultati mjerenja

Prije početka mjerenja kruti držač fiksiran je stegama na pokretnu vodilicu kako bi izbjegli pomicanje držača tijekom mjerenja. Granitni lineal također je pričvršćen kako bi se izbjegli neželjeni pomaci.

Za prvo mjerenje sustav je postavljen na pokretnu vodilicu kao na slici 44. lijevo, a mjerenje je napravljeno u četiri uzastopna ponavljanja, tablica 10.

**Tablica 10. Mjerenja krutim držačem**

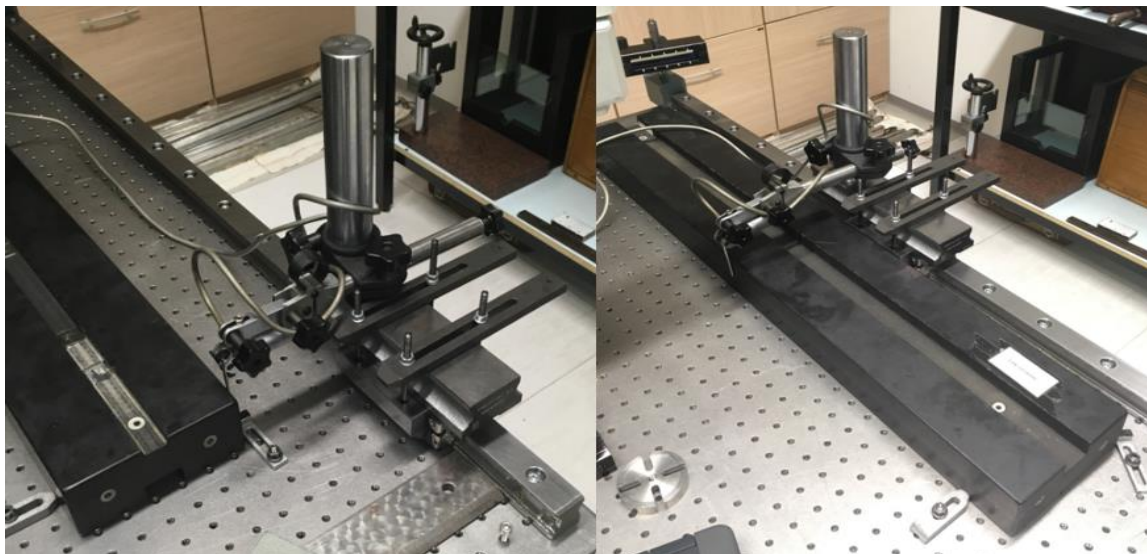
Pozicija mjerenja [mm]	1. Mjerenje	2. Mjerenje	3. Mjerenje	4. Mjerenje
0	0,5	0,2	0,8	0,2
50	0,8	1,2	1,2	1
100	1,2	1,8	2	2
150	2	2	2	2
200	2,2	2,9	2,8	2,8
250	4	4,8	4,8	4,8
300	7	8	7,8	8,8
350	10	10,5	10,2	10,2
400	12	12,5	12,5	12,2
450	12,7	12,8	12,8	12,8
500	11,5	11,2	12	11,8
550	8,5	9,5	8,9	9
600	6	6	5,8	5,8
650	2	2,1	2,2	2,2
700	-1	-1,2	-1	-0,9
750	-2,2	-2	-1,5	-1,8
800	0,9	1	1,2	1,8

Iz rezultat mjerenja izračunate su vrijednosti nagiba pravca i odsječka pravca najmanjih kvadrata za svako mjerenje, tablica 11.

**Tablica 11. Nagib pravca i odsječak pravca za mjerenje krutim držačem**

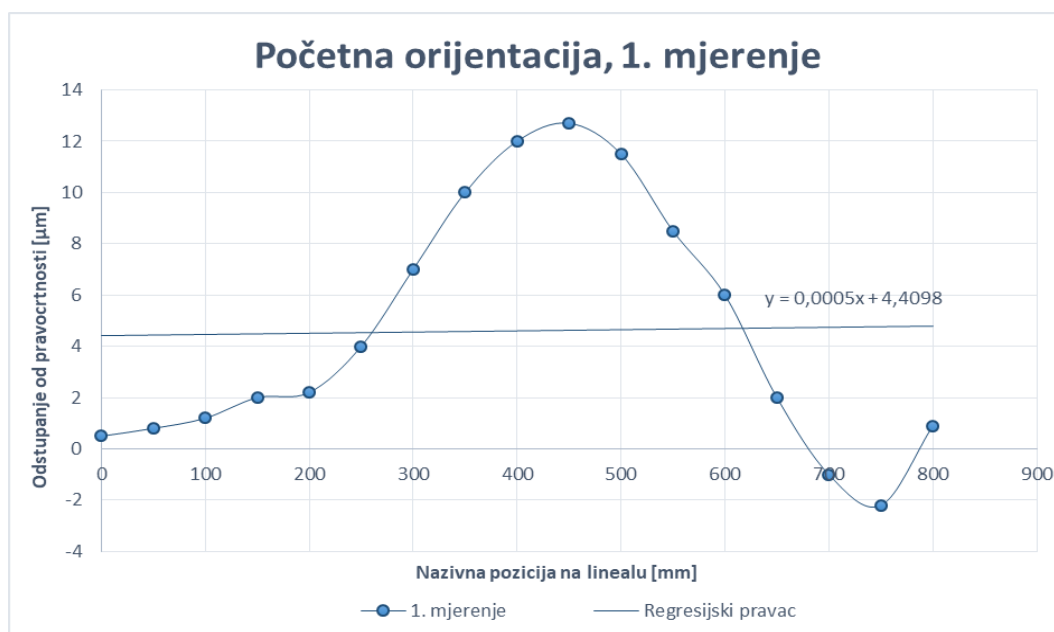
	1. Mjerenje	2. Mjerenje	3. Mjerenje	4. Mjerenje
Nagib pravca:	0,000461	0,000083	0,000127	0,000490
Odsječak pravca:	4,409804	4,866667	4,919608	4,786275





Slika 44. Orijehtacije krutog držača, početna orijentacija (lijevo) i reverzna orijentacija (desno)

Na slici 45. prikazan je dijagram početne orijentacije 1. mjerenja iz tablice 10. te je označen regresijski pravac.

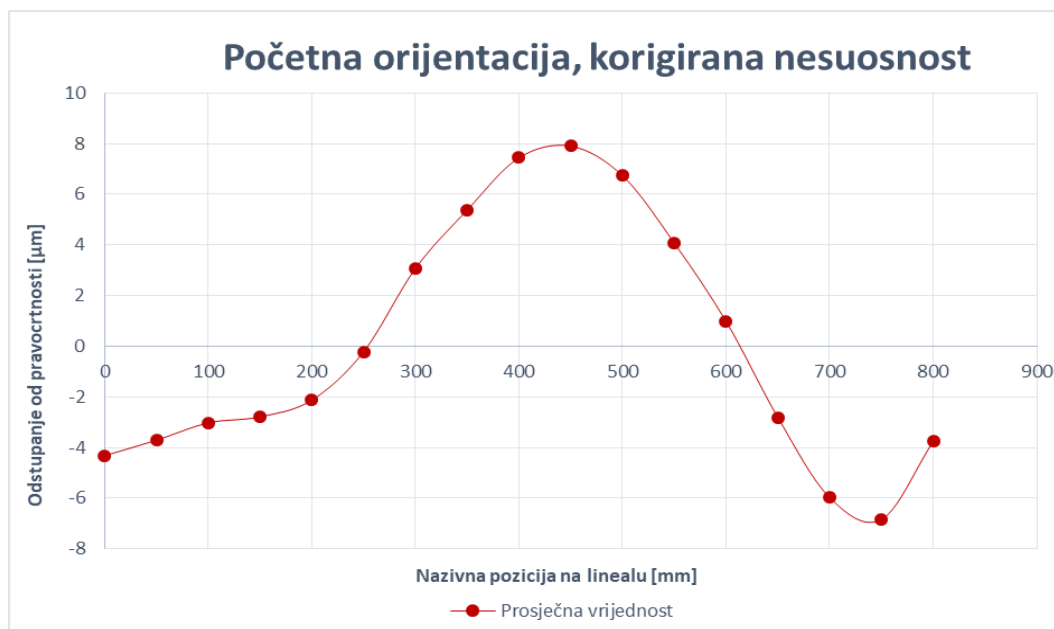


Slika 45. Odstupanje od pravocrtnosti - početna orijentacija 1. mjerenje

Unatoč fiksiranju mjernog ticala i granitnog lineala, neizbježni su mali pomaci i male nesuosnosti. Izmjerenim podacima potrebno je eliminirati nesuosnost primjenom metode najmanjih kvadrata. Dostupni su svi elementi da se matematičkim putem može primjeniti metoda najmanjih kvadrata prema formuli (7) i izračunati prosječna vrijednost svih pozicija mjerenja, tablica 12 iz kojih će se u daljnjem dijelu odrediti odstupanje od pravocrtnosti granitnog lineala i odstupanje od pravocrtnosti vodilice.

Tablica 12. Metoda najmanjih kvadrata za mjerenja krutim držačem

Pozicija mjerenja [mm]	1. Mjerenje	2. Mjerenje	3. Mjerenje	4. Mjerenje	Prosječna vrijednost
0	-3,91	-4,67	-4,12	-4,59	-4,32
50	-3,63	-3,67	-3,73	-3,81	-3,71
100	-3,26	-3,08	-2,93	-2,84	-3,02
150	-2,48	-2,88	-2,94	-2,86	-2,79
200	-2,30	-1,98	-2,15	-2,08	-2,13
250	-0,53	-0,09	-0,15	-0,11	-0,22
300	2,45	3,11	2,84	3,87	3,07
350	5,43	5,60	5,24	5,24	5,38
400	7,41	7,60	7,53	7,22	7,44
450	8,08	7,90	7,82	7,79	7,90
500	6,86	6,29	7,02	6,77	6,73
550	3,84	4,59	3,91	3,94	4,07
600	1,31	1,08	0,80	0,72	0,98
650	-2,71	-2,82	-2,80	-2,90	-2,81
700	-5,73	-6,13	-6,01	-6,03	-5,97
750	-6,96	-6,93	-6,52	-6,95	-6,84
800	-3,88	-3,93	-3,82	-3,38	-3,75



Slika 46. Odstupanje od pravocrtnosti - početna orijentacija, korigirana nesuosnost prosječna vrijednost

Slika 46. prikazuje dijagram korigirane nesuosnosti prosječnih vrijednosti za početnu orijentaciju dobivenih provedbom metode najmanjih kvadrata iz tablice 12.

Kada ne bi koristili reverzibilnu metodu separacije pogreške ovo bi bio kraj mjerenja. Prema tablici 12. raspon odstupanja od pravocrtosti granitnog lineala iznosio bi od  $-6.8 \mu\text{m}$  do  $7.9 \mu\text{m}$  iz čega slijedi da je odstupanja od pravocrtosti granitnog lineala s krutim držačem iznosa  $14.7 \mu\text{m}$

Reverzibilna metoda separacije pogreške zahtjeva mjerenja i u 'reverznom' smjeru pa se zbog toga treba promijeniti pozicija mjernog ticala i mjernog predmeta, kao na slici 28. Prema tome granitni lineal je zarotiran za  $180^\circ$  i pričvršćen, a mjerno ticalo je zadržalo orijentaciju, ali mu je promijenjena pozicija zbog pomaka granitnog lineala primjer slika 44. Na mjernom ticalu također je promijenjen smjer mjerne sile koji je sad postavljen u suprotnom smjeru. Reverzno mjerenje također je obavljeno u četiri uzastopna mjerenja, tablica 13.

**Tablica 13. Reverzna mjerenja krutim držačem**

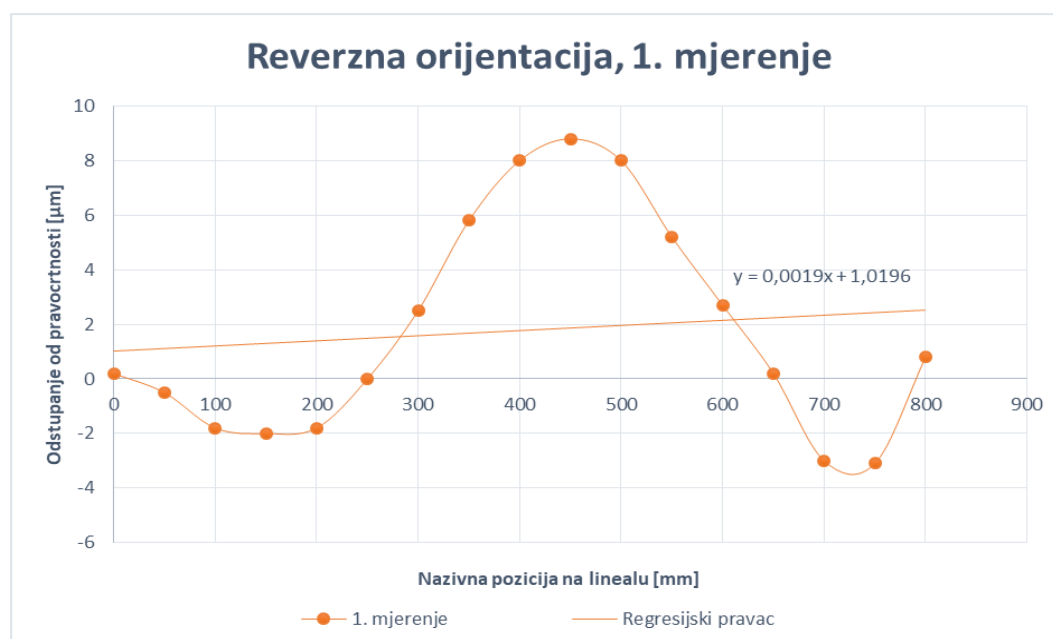
Pozicija mjerenja [mm]	1. Mjerenje	2. Mjerenje	3. Mjerenje	4. Mjerenje
0	0,2	0,5	1	1,2
50	-0,5	-0,1	-0,1	0
100	-1,8	-0,8	-1,2	-1,2
150	-2	-1,2	-1,2	-1
200	-1,8	-1,5	-1,2	-0,8
250	0	0,5	0,8	0,8
300	2,5	3	3,2	3,5
350	5,8	6	6	6,4
400	8	8,5	8,2	8,8
450	8,8	9	9	9,3
500	8	8,5	8,5	8,8
550	5,2	5,2	5,5	6
600	2,7	3	3	3
650	0,2	0,2	0,8	1
700	-3	-2,5	-2,2	-2
750	-3,1	-3	-2,5	-2,8
800	0,8	1,2	1	1,5

Nakon mjerenja izračunate su vrijednosti nagiba pravca i odsjeka pravca najmanjih kvadrata za svako mjerenje, tablica 14.

**Tablica 14. Nagib pravca i odsječak pravca za reverzno mjerenje krutim držačem**

	1. Mjerenje	2. Mjerenje	3. Mjerenje	4. Mjerenje
Nagib pravca:	0,001863	0,001382	0,001554	0,001583
Odsječak pravca:	1,019608	1,594118	1,649020	1,866667

Na slici 47. prikazan je dijagram reverzne orijentacije 1. mjerenja iz tablice 13. te je označen regresijski pravac.



**Slika 47. Odstupanje od pravocrtosti - reverzna orijentacija, 1. mjerenje**

Iz tablica 13. i 14. matematičkim putem primjenjuje se metoda najmanjih kvadrata i izračuna se prosječna vrijednost svih mjerenja za reverznu orijentaciju, tablica 15. iz kojih će se u daljnjem dijelu odrediti odstupanje od pravocrtosti vodilice i odstupanje od pravocrtosti granitnog lineala.

Slika 48. prikazuje dijagram korigirane nesuosnosti prosječnih vrijednosti reverzne orijentacije dobivenih provedbom metode najmanjih kvadrata iz tablice 8.

Tablica 15. Metoda najmanjih kvadrata za mjerenja krutim držačem

Pozicija mjerenja [mm]	1. Mjerenje	2. Mjerenje	3. Mjerenje	4. Mjerenje	Prosječna vrijednost
0	-0,82	-1,09	-0,65	-0,67	-0,81
50	-1,61	-1,76	-1,83	-1,95	-1,79
100	-3,01	-2,53	-3,00	-3,23	-2,94
150	-3,30	-3,00	-3,08	-3,10	-3,12
200	-3,19	-3,37	-3,16	-2,98	-3,18
250	-1,49	-1,44	-1,24	-1,46	-1,41
300	0,92	0,99	1,08	1,16	1,04
350	4,13	3,92	3,81	3,98	3,96
400	6,24	6,35	5,93	6,30	6,20
450	6,94	6,78	6,65	6,72	6,77
500	6,05	6,21	6,07	6,14	6,12
550	3,16	2,85	3,00	3,26	3,07
600	0,56	0,58	0,42	0,18	0,44
650	-2,03	-2,29	-1,86	-1,90	-2,02
700	-5,32	-5,06	-4,94	-4,98	-5,07
750	-5,52	-5,63	-5,31	-5,85	-5,58
800	-1,71	-1,50	-1,89	-1,63	-1,68



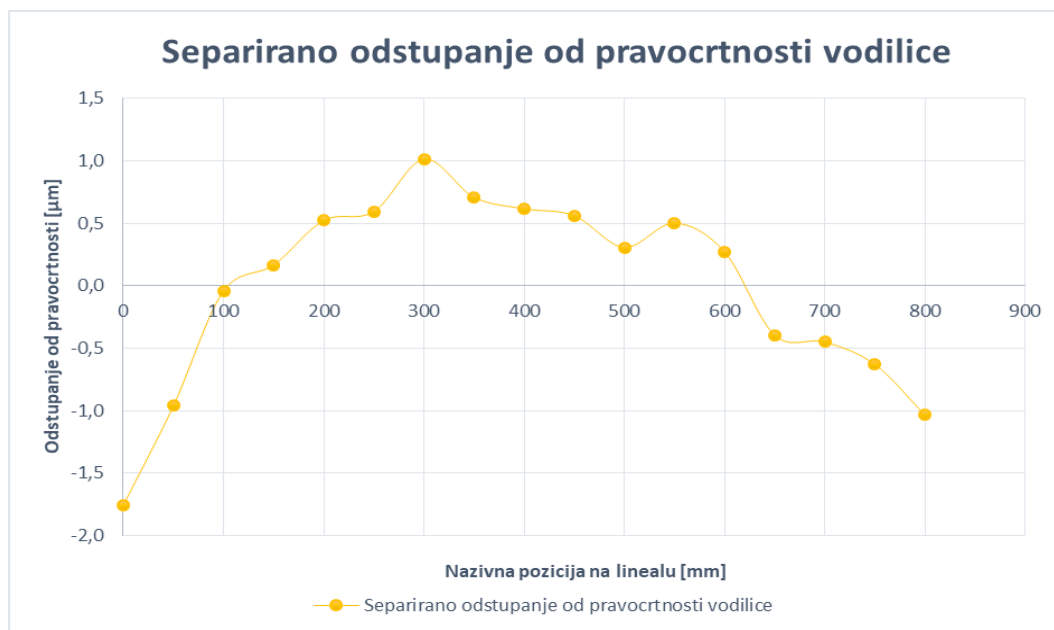
Slika 48. Odstupanje od pravocrtnosti - reverzna orijentacija, korigirana nesuosnost, prosječna vrijednost

Svako mjerenje unatoč tome što je sustav fiksiran sadrži male pomake koji uzrokuju nesuosnost. Metodom najmanjih kvadrata eliminiramo pogrešku nesuosnosti i mjerni podaci se mogu međusobno usporediti. Iz prosječnih vrijednosti početne i reverzne orijentacije može se izračunati odstupanje od pravocrtosti vodilice i odstupanje od pravocrtosti granitnog lineala reverzibilnom metodom separacije pogreške, tablica 16.

**Tablica 16. Pogreške vođenja i odstupanja od pravocrtosti granitnog lineala reverzibilnom metodom separacije pogreške s krutim držačem**

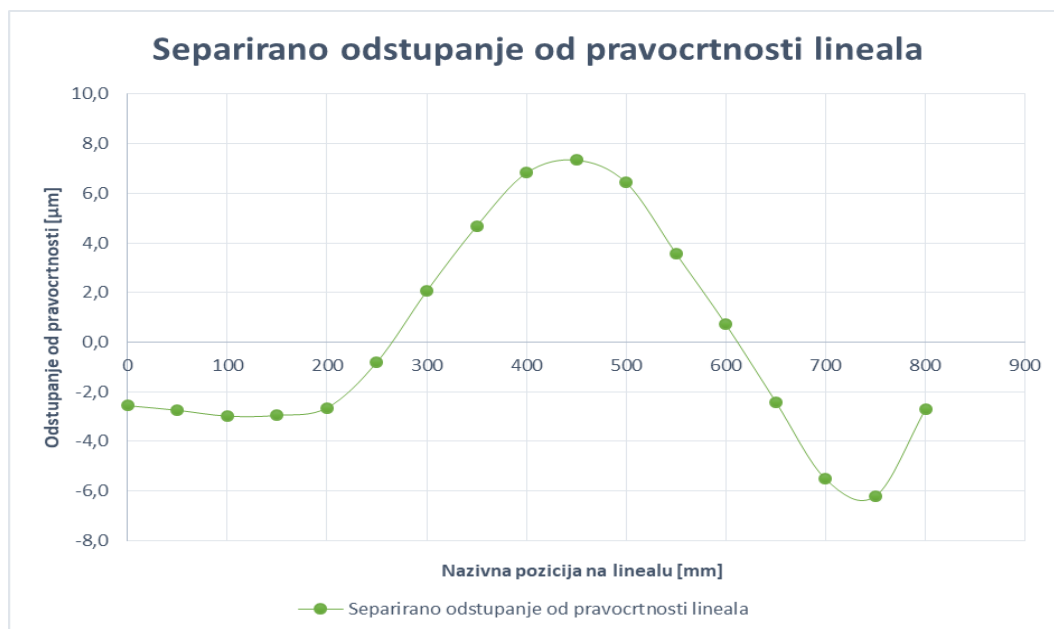
Pozicija mjerenja [mm]	Pogreška vođenja [ $\mu\text{m}$ ]	Pogreška pravocrtosti [ $\mu\text{m}$ ]
0	-1,8	-2,6
50	-1,0	-2,7
100	0,0	-3,0
150	0,2	-3,0
200	0,5	-2,7
250	0,6	-0,8
300	1,0	2,1
350	0,7	4,7
400	0,6	6,8
450	0,6	7,3
500	0,3	6,4
550	0,5	3,6
600	0,3	0,7
650	-0,4	-2,4
700	-0,4	-5,5
750	-0,6	-6,2
800	-1,0	-2,7

Od podatke iz tablice 16. slijedi dijagram separirano odstupanje od pravocrtosti vodilice i dijagram separirano odstupanje od pravocrtosti granitnog lineala prikazani na slici 49. i slici 50. Prema rezultatima iz tablice 16. raspon pogreške vođenja iznosi od -1,8  $\mu\text{m}$  do 1  $\mu\text{m}$  što znači da pogreška vođenja reverzibilnom metodom separacije pogreške na krutom držaču iznosi 2,8  $\mu\text{m}$ , slika 49.



**Slika 49. Separirano odstupanje od pravocrtnosti vodilice**

Raspon odstupanja od pravocrtnosti granitnog lineala iznosi od  $-6,2 \mu\text{m}$  do  $7,3 \mu\text{m}$  što znači da je odstupanje od pravocrtnosti granitnog lineala reverzibilnom metodom separacije pogreške na krutom držaču iznosi  $13,5 \mu\text{m}$ , slika 50.



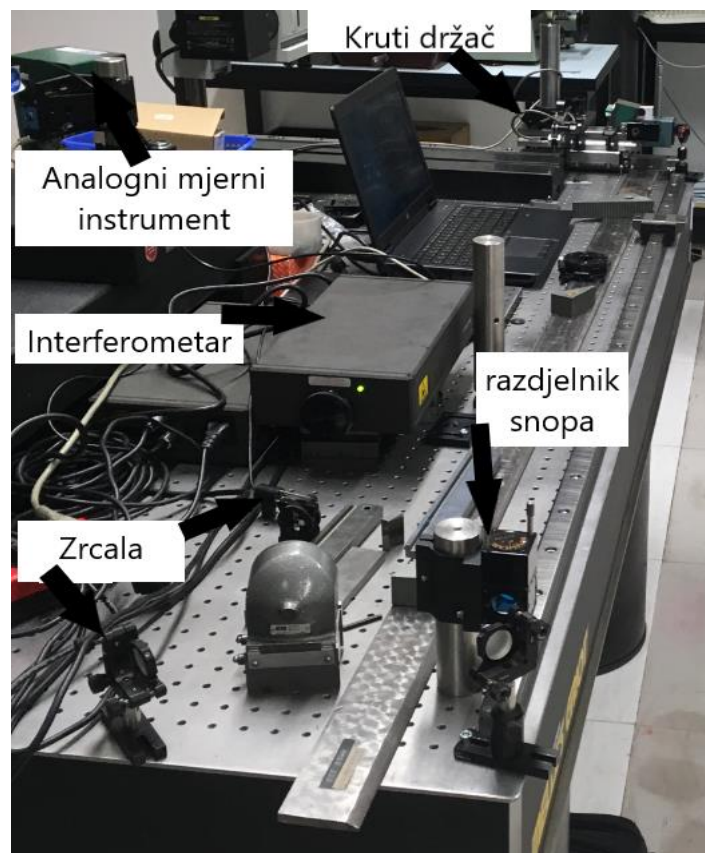
**Slika 50. Separirano odstupanje od pravocrtnosti granitnog lineala**

Prema podacima iz prethodnog mjerenja o stabilnosti ticala može se zaključiti da nestabilnost ticala od  $\pm 0,1 \mu\text{m}$  ima skoro neprimjetan utjecaj na separirano odstupanje vođenja. Dok na pogrešku pravocrtности granitnog lineala utjecaj nestabilnosti ticala od  $\pm 0,1 \mu\text{m}$  je totalno neprimjetan.

Prema zaključku iz prethodnog mjerenja o stabilnosti ticala znamo da je kruti držač stabilniji u odnosu na fleksibilnog magnetnog držača. Zbog toga će se u sljedećim mjerenjima koristiti će se samo kruti držač kao referentni.

#### 5.4. Mjerenje odstupanja od pravocrtности reverzibilnom metodom separacije pogreške na krutom držaču s laserskim pozicioniranjem

U prethodna dva testa ručno je izvedeno pozicioniranje mjernog ticala na označene točke na granitnom linealu te se potom mjerilo. Međutim u takvoj metodi mjerenja nemoguće se uvijek pozicionirati u istu točku, zbog čega izmjerene vrijednosti u različitim mjerenjima mogu sadržati veće odstupanje koje u analizi nije uzeto u obzir. Zbog toga je napravljeno mjerenje pogreške pravocrtности reverzibilnom metodom na krutom držaču s laserskim pozicioniranjem preko interferometra, slika 51.



Slika 51. Sustav krutog držača s laserskim pozicioniranjem



Mjerno područje analognog mjernog instrumenta postavljeno je na 30  $\mu\text{m}$  i nije moglo biti manje zato što je maksimalna pogreška pravocrtnosti vodilice veća od 10  $\mu\text{m}$ . Napravljena je pauza 15 minuta od postavljanja sustava do početka mjerenja kako bi se izbjegle 'inicijalne' pogreške.

Mjereni postupak i analiza su u potpunosti isti kao u prethodnom poglavlju 'mjerenje odstupanja od pravocrtnosti reverzibilnom metodom separacije pogreške na krutom držaču' samo se pozicioniranje vršilo uz pomoć laserskog interferometra, a ne ručno kao u prethodnom poglavlju. Zbog toga će se prikazati samo rezultati mjerenja bez opisa postupka mjerenja.

Mjerenja reverzibilnom metodom separacije pogreške laserskim pozicioniranjem na krutom držaču napravljena su u tri uzastopna ponavljanja tablica 17.

**Tablica 17. Mjerenja laserskim pozicioniranjem na krutom držaču**

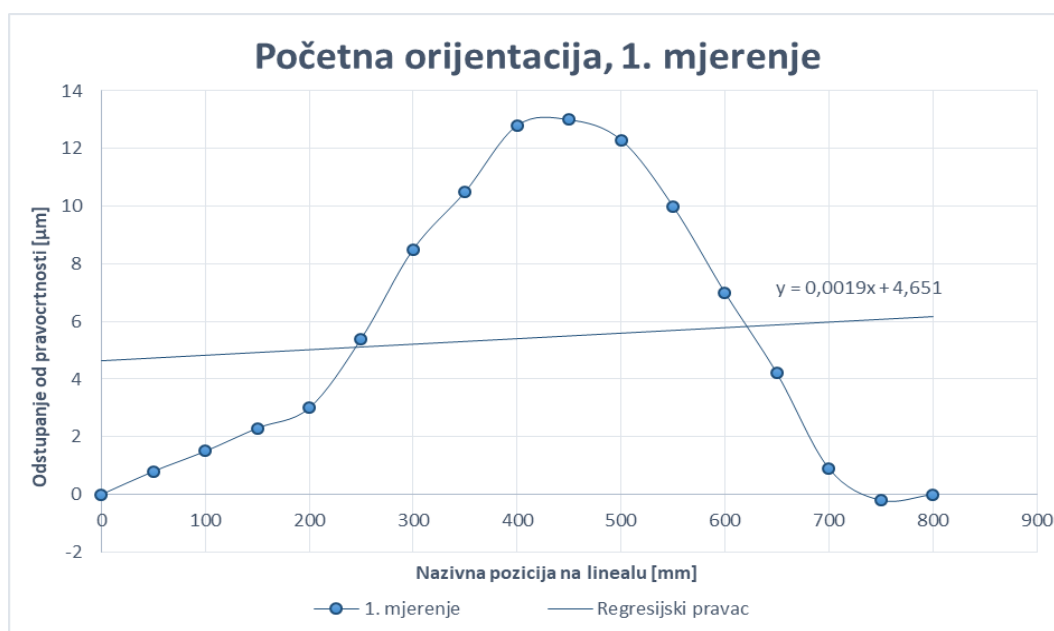
Pozicija mjerenja [mm]	1. Mjerenje	2. Mjerenje	3. Mjerenje
0	0	0	0
50	0,8	1,2	0,5
100	1,5	2	1,8
150	2,3	2,8	2,2
200	3	3,5	4
250	5,4	6	5
300	8,5	8,2	7,5
350	10,5	11	10,2
400	12,8	13	12,2
450	13	13,8	12,8
500	12,3	13	12
550	10	10,2	10
600	7	7,3	6,8
650	4,2	4,5	3,8
700	0,9	1,2	1
750	-0,2	-0,8	-1,2
800	0	-0,3	0

Zatim je potrebno izračunati vrijednosti nagiba pravca i odsjeka pravca najmanjih kvadrata za svako mjerenje, tablica 18.

**Tablica 18. Nagib pravca i odsječak pravca za mjerenje s laserskim pozicioniranjem na krutom držaču**

	1. Mjerenje	2. Mjerenje	3. Mjerenje
Nagib pravca:	0,001902	0,001348	0,001426
Odsječak pravca:	4,650980	5,143137	4,641176

Na slici 52. prikazan je dijagram početne orijentacije 1. mjerenja iz tablice 19. te je označen regresijski pravac.

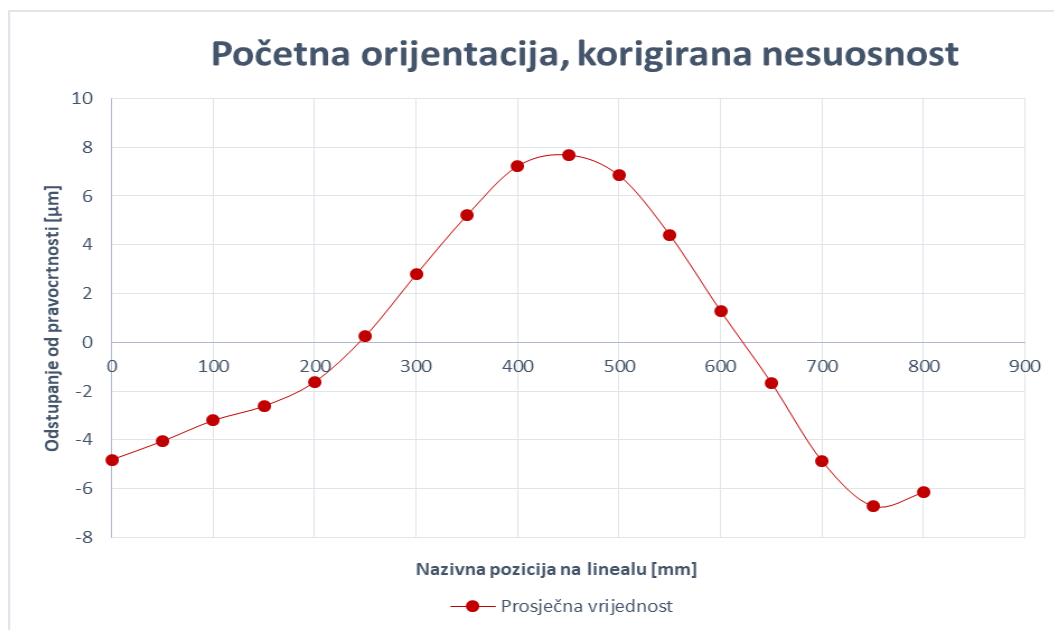


**Slika 52. Odstupanje od pravocrtosti - početna orijentacija 1. mjerenje**

Prema tablicama 17. i 18. matematičkim putem primjenjuje se metoda najmanjih kvadrata i računa se prosječna vrijednost za svaku poziciju mjerenja, tablica 19.

**Tablica 19. Metoda najmanjih kvadrata za mjerenja laserskim pozicioniranjem na krutom držaču**

Pozicija mjerenja [mm]	1. Mjerenje	2. Mjerenje	3. Mjerenje	Prosječna vrijednost
0	-4,65	-5,14	-4,64	-4,81
50	-3,95	-4,01	-4,21	-4,06
100	-3,34	-3,28	-2,98	-3,20
150	-2,64	-2,55	-2,66	-2,61
200	-2,03	-1,91	-0,93	-1,62
250	0,27	0,52	0,00	0,27
300	3,28	2,65	2,43	2,79
350	5,18	5,39	5,06	5,21
400	7,39	7,32	6,99	7,23
450	7,49	8,05	7,52	7,69
500	6,70	7,18	6,65	6,84
550	4,30	4,32	4,57	4,40
600	1,21	1,35	1,30	1,29
650	-1,69	-1,52	-1,77	-1,66
700	-5,08	-4,89	-4,64	-4,87
750	-6,28	-6,95	-6,91	-6,71
800	-6,17	-6,52	-5,78	-6,16



**Slika 53. Odstupanje od pravocrtnosti - početna orijentacija, korigirana nesuosnost prosječna vrijednost**

Slika 53. prikazuje dijagram korigirane nesuosnosti prosječnih vrijednosti dobivenih provedbom metode najmanjih kvadrata iz tablice 19.

U slučaju da ne bi primjenili reverzibilnu metodu separacije pogreške mjerenje bi bilo gotovo u ovom koraku. Prema tablici 12. raspon odstupanja od pravocrtnosti granitnog lineala iznosio bi od  $-6.8 \mu\text{m}$  do  $7.9 \mu\text{m}$  iz čega slijedi da je odstupanja od pravocrtnosti granitnog lineala s fleksibilnim magnetnim držačem iznosa  $14.7 \mu\text{m}$

Reverzibilna metoda separacije pogreške zahtjeva mjerenja i u reverznom smjeru, pa se zbog toga treba izmijeniti pozicija i orijentacija mjernog ticala i mjernog predmeta, kao na slici 28. U reverznom smjeru napravljena su u tri uzastopna mjerenja

**Tablica 20. Reverzno mjerenja laserskim pozicioniranjem na krutom držaču**

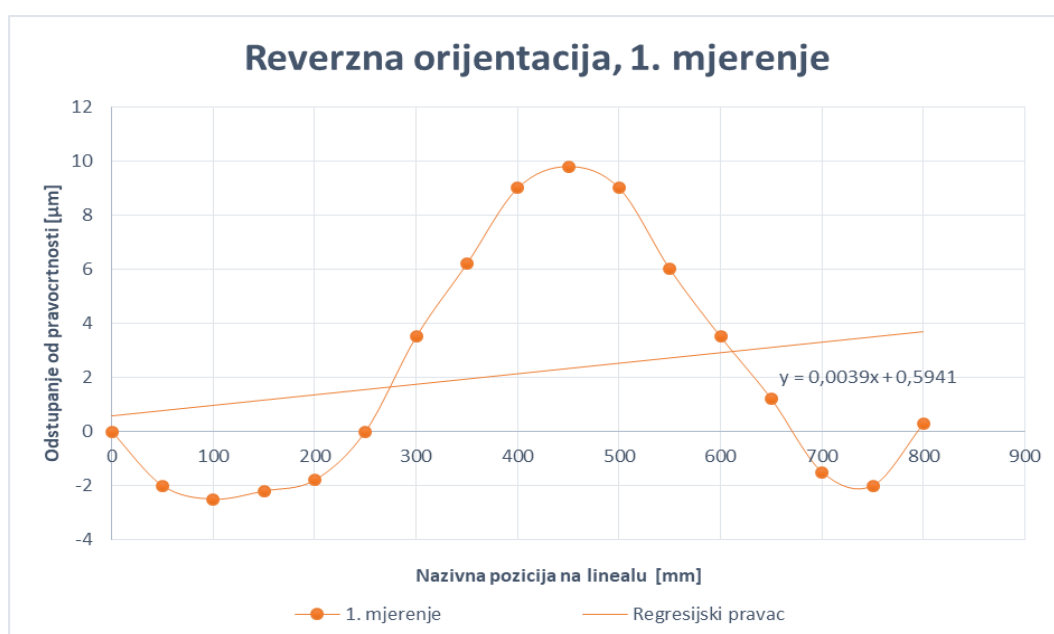
Pozicija mjerenja [mm]	1. Mjerenje	2. Mjerenje	3. Mjerenje
0	0	0	0
50	-2	-2	-2,2
100	-2,5	-2,8	-3
150	-2,2	-2	-2,5
200	-1,8	-2	-2,5
250	0	0	-0,5
300	3,5	3	2,8
350	6,2	6	5,5
400	9	9	8
450	9,8	9,8	9
500	9	9	8,5
550	6	6	5,5
600	3,5	3,5	3
650	1,2	1,5	1
700	-1,5	-1,2	-2
750	-2	-1,8	-1,8
800	0,3	0,8	0,5

Iz rezultata mjerenja izračunate su vrijednosti nagiba pravca i odsjeka pravca najmanjih kvadrata za svako mjerenje, tablica 21.

**Tablica 21. Nagib pravca i odsječak pravca za reverzno mjerenje s laserskim pozicioniranjem na krutom držaču**

	1. Mjerenje	2. Mjerenje	3. Mjerenje
Nagib pravca:	0,003882	0,004446	0,004176
Odsječak pravca:	0,594118	0,386275	0,052941

Na slici 54. prikazan je dijagram rezultata reverzne orijentacije 1. mjerenja iz tablice 20. te je označen regresijski pravac.

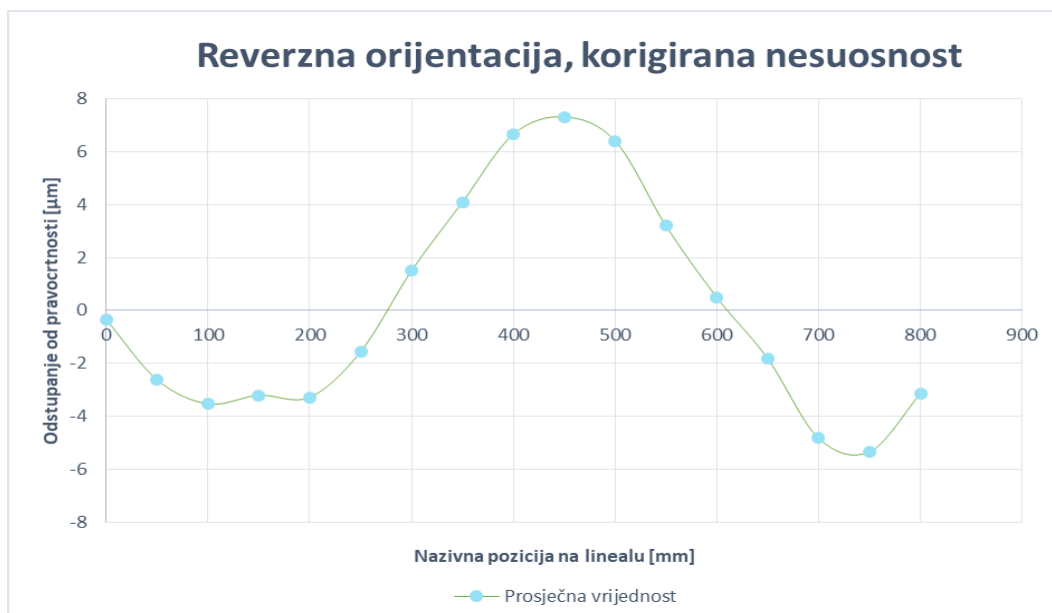


**Slika 54. Odstupanje od pravocrtnosti - reverzna orijentacija 1. mjerenje**

Iz tablice 20. i 21. matematičkim putem primjenjuje se metoda najmanjih kvadrata i računa se prosječna vrijednost za svaku poziciju mjerenja, tablica 22.

**Tablica 22. Metoda najmanjih kvadrata za mjerenja laserskim pozicioniranjem na krutom držaču**

Pozicija mjerenja [mm]	1. Mjerenje	2. Mjerenje	3. Mjerenje	Prosječna vrijednost
0	-0,59	-0,39	-0,05	-0,34
50	-2,79	-2,61	-2,46	-2,62
100	-3,48	-3,63	-3,47	-3,53
150	-3,38	-3,05	-3,18	-3,20
200	-3,17	-3,28	-3,39	-3,28
250	-1,56	-1,50	-1,60	-1,55
300	1,74	1,28	1,49	1,51
350	4,25	4,06	3,99	4,10
400	6,85	6,84	6,28	6,65
450	7,46	7,41	7,07	7,31
500	6,46	6,39	6,36	6,40
550	3,27	3,17	3,15	3,20
600	0,58	0,45	0,44	0,49
650	-1,92	-1,78	-1,77	-1,82
700	-4,81	-4,70	-4,98	-4,83
750	-5,51	-5,52	-4,99	-5,34
800	-3,40	-3,14	-2,89	-3,15



**Slika 55. Odstupanje od pravocrtnosti - reverzna orijentacija, korigirana nesuosnost prosječna vrijednost**

Slika 55. prikazuje dijagram korigirane nesuosnosti prosječnih vrijednosti za reverznu orijentaciju dobivenih nakon provedbe metode najmanjih kvadrata iz tablice 22.



**Slika 56. Primjer ishodišne točke laserskog interferometra**

Mjerni sustav sadrži nekoliko novih komponenata: interferometar izvor svjetlosti, zrcala za usmjeravanje snopa svjetla, razdjelnik snopa i reflektor koji se nalazi na krutom držaču. Interferometar je spojen na prijenosno računalo s kojeg se onda očitava pomak, slika 56.

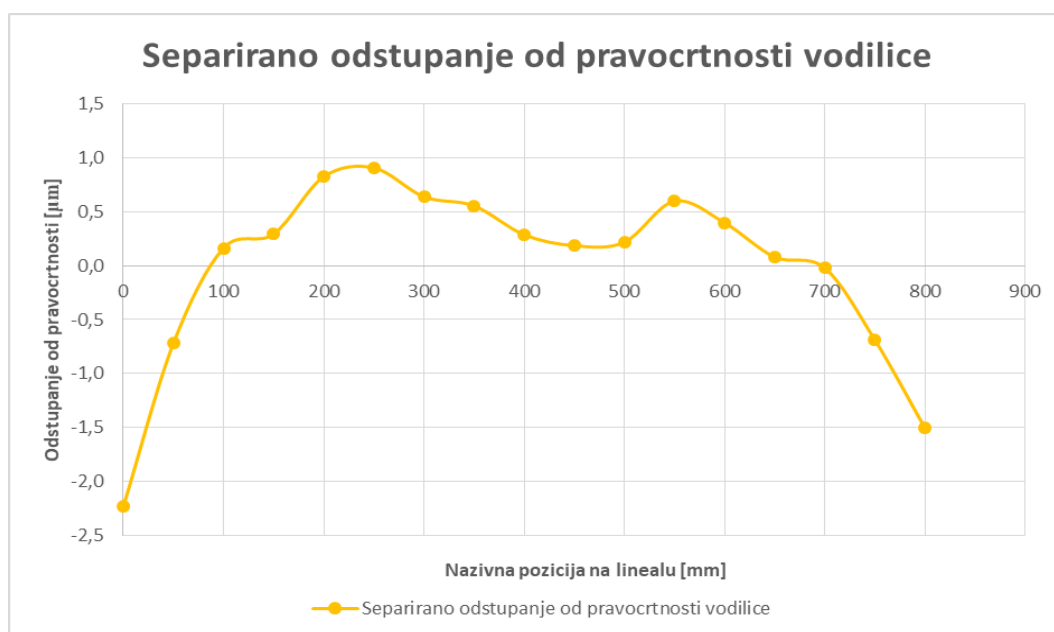
Cijeli sustav je pozicioniran s obzirom na interferometar, međutim pogreška pravocrtnosti mjerena je mehaničkim ticalom i analognim mjernim instrumentom.

Metodom najmanjih kvadrata eliminira se pogreška nesuosnosti i mjerni podaci se mogu međusobno usporediti. Iz prosječnih vrijednosti početne i reverzne orijentacije reverzibilnom metodom separacije pogreške sad se može izračunati odstupanje od pravocrtnosti vodilice i odstupanje od pravocrtnosti granitnog lineala tablica 23.

**Tablica 23. Pogreške vođenja i odstupanja od pravocrtnosti granitnog lineala reverzibilnom metodom separacije pogreške s laserskim pozicioniranjem na krutom držaču**

Pozicija mjerenja [mm]	Pogreška vođenja [ $\mu\text{m}$ ]	Pogreška pravocrtnosti [ $\mu\text{m}$ ]
0	-2,2	-2,6
50	-0,7	-3,3
100	0,2	-3,4
150	0,3	-2,9
200	0,8	-2,5
250	0,9	-0,6
300	0,6	2,1
350	0,6	4,7
400	0,3	6,9
450	0,2	7,5
500	0,2	6,6
550	0,6	3,8
600	0,4	0,9
650	0,1	-1,7
700	0,0	-4,8
750	-0,7	-6,0
800	-1,5	-4,7

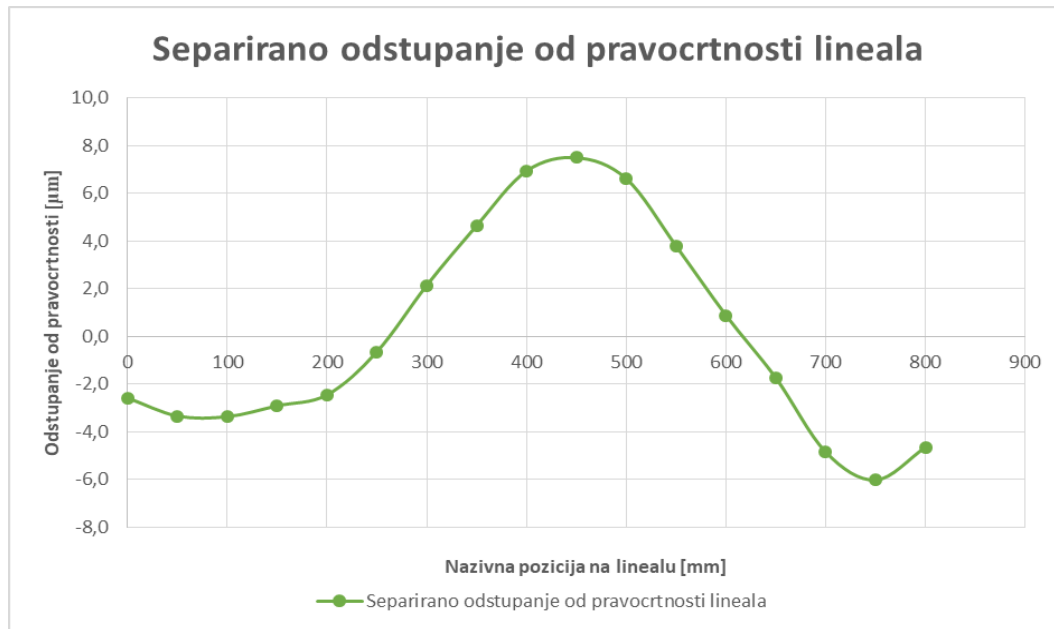
Prema podacima iz tablice 23. raspon pogreške vođenja iznosi od  $-2,2 \mu\text{m}$  do  $0,9 \mu\text{m}$  što znači da odstupanje od pravocrtnosti vodilice reverzibilnom metodom separacije pogreške s krutim držačem pri laserskom pozicioniranju iznosi  $3,1 \mu\text{m}$ , slika 57.



**Slika 57. Separirano odstupanje od pravocrtnosti vodilice**



Raspon odstupanja od pravocrtnosti granitnog lineala iznosi od  $-6 \mu\text{m}$  do  $7,5 \mu\text{m}$  što znači da odstupanje od pravocrtnosti granitnog lineala reverzibilnom metodom separacije pogreške s krutim držačem pri laserskom pozicioniranju iznosi  $13,5 \mu\text{m}$ , slika 58.



**Slika 58. Separirano odstupanje od pravocrtnosti granitnog lineala**

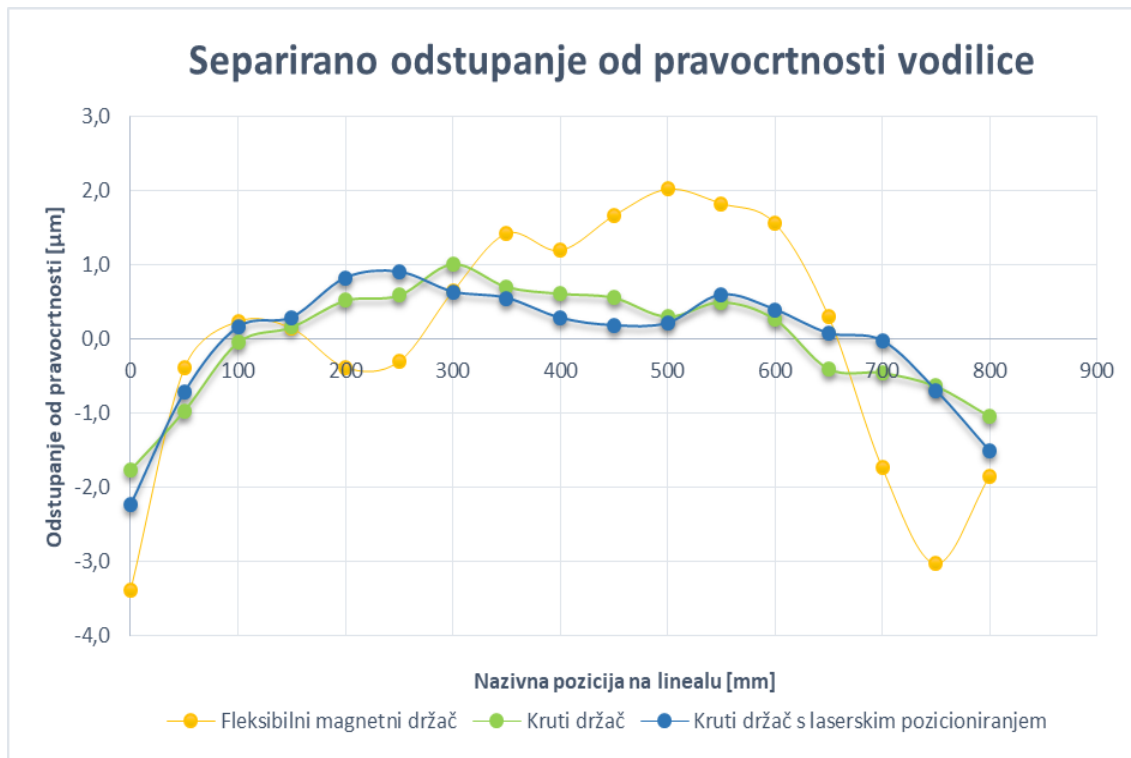
### 5.5. Usporedba rezultat mjerenja fleksibilnog magnetnog držača, krutog držača i krutog držača s laserskim pozicioniranjem

U ovom potpoglavlju prikazat će se i prokomentirati usporedba rezultata triju mjernih metoda s tim da će se usporediti mjerenja fleksibilnog magnetnog držača i krutog držača s ciljem odabira boljeg držača i usporedit će se metoda krutog držača s metodom krutog držača pri laserskom pozicioniranju kako bi se ustanovio utjecaj pozicioniranja na krajnji rezultat mjerenja.

Na slici 59. prikazane su pogreške vođenja triju mjernih metoda: fleksibilnog magnetnog držača, krutog držača i krutog držača s laserskim pozicioniranjem.

Prema rezultatima mjerenja fleksibilnog magnetnog držača i krutog držača iz potpoglavlja 5.2 i 5.3 može se zaključiti da se pogreška vođenja razlikuje između dvije metode. Iz dijagram usporedbe slika 59. razlika pogreške vođenja dviju metoda iznosi  $2,6 \mu\text{m}$ . Prema zaključku mjerenja iz potpoglavlja 5.1 i 5.2 o stabilnosti ticala znamo da je kruti držač stabilniji u odnosu na fleksibilni magnetni držač, prema tome razlike u pogreškama vođenja mogu se prepisati nižoj stabilnosti fleksibilnog magnetnog držača.

Usporedbom rezultata mjerenja metode krutog držača s metodom krutog držača pri laserskom pozicioniranju iz potpoglavlja 5.3 i 5.4 pogreške vođenja dviju metodi približno su identične. Prema dijagramu usporedbe slika 59. može se zaključiti da razlika pogreške vođenja dviju metoda iznosi  $0,3 \mu\text{m}$ .



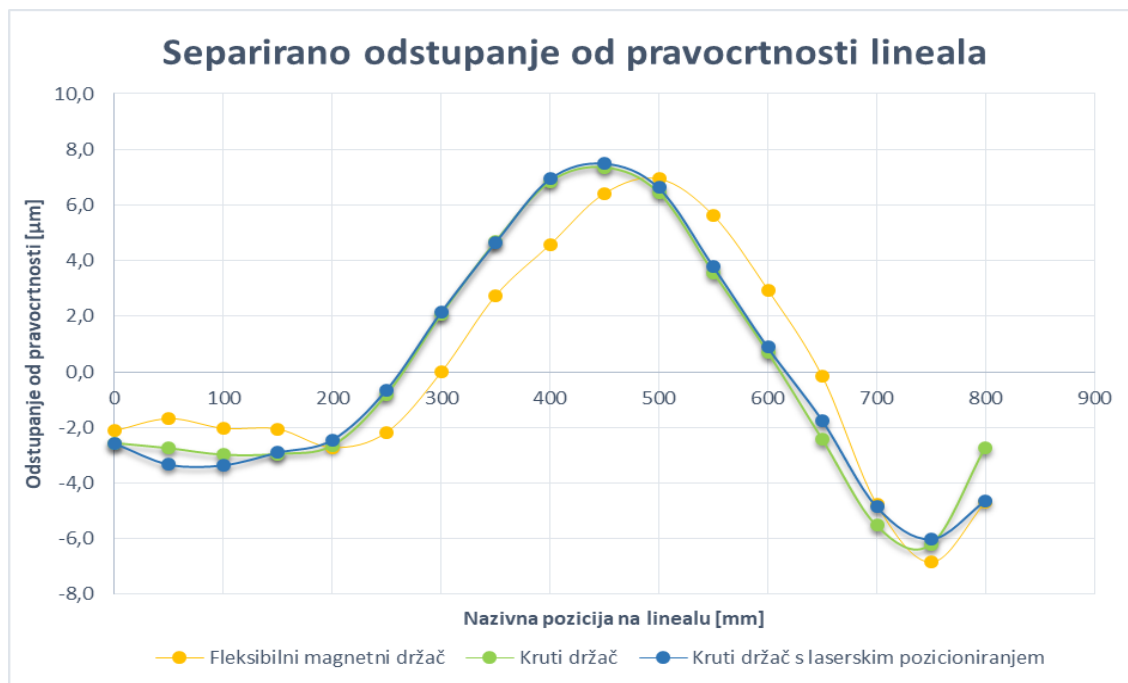
**Slika 59. Usporedba separiranog odstupanja od pravocrtnosti vodilice tri mjerne metode**

Na slici 60. prikazana su odstupanja od pravocrtnosti granitnog lineala triju mjernih metoda: fleksibilnog magnetnog držača, krutog držača i krutog držača s laserskim pozicioniranjem.

Prema rezultatima mjerenja fleksibilnog magnetnog držača i krutog držača iz potpoglavlja 5.2 i 5.3 može se zaključiti da su minimalne razlike separiranog odstupanja od pravocrtnosti dviju metoda. Iz dijagram usporedbe slika 60. razlika odstupanja od pravocrtnosti granitnog lineala dviju metoda iznosi  $0,3 \mu\text{m}$ .

Usporedbom rezultata mjerenja metode krutog držača s metodom krutog držača pri laserskom pozicioniranju iz potpoglavlja 5.3 i 5.4 te iz dijagrama usporedbe slika 60. odstupanja od pravocrtnosti skoro se ne razlikuju što potvrđuje činjenica da je odstupanje od

pravocrtnosti istog reda veličine i iznosi 13,5  $\mu\text{m}$ , odnosno razlika pogreške pravocrtnosti je 0  $\mu\text{m}$ .



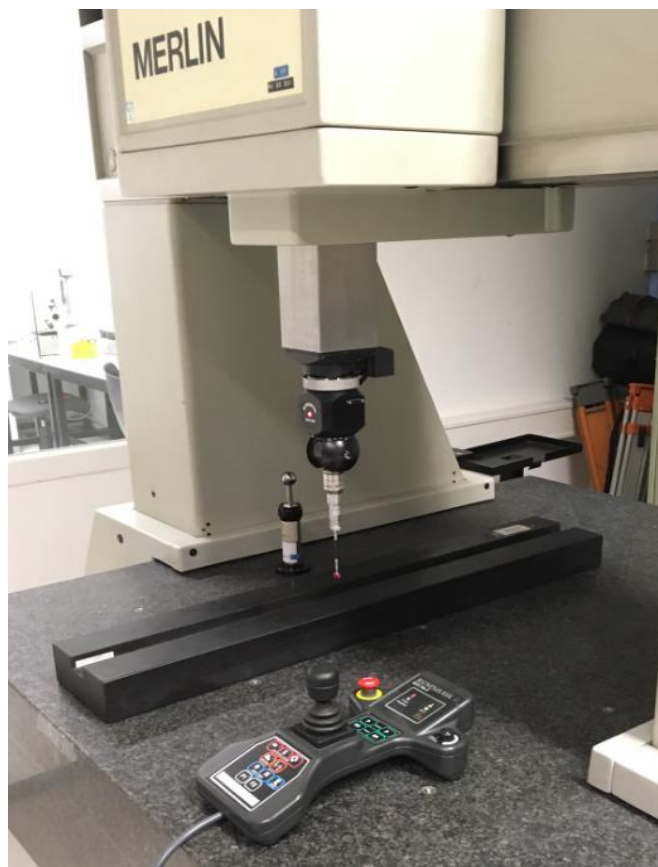
**Slika 60. Usporedba odstupanja od pravocrtnosti tri mjerne metode**

Prema rezultatima usporedbe mjerenja kruti držač mjeri nižu pogrešku vođenja i niže odstupanje od pravocrtnosti granitnog lineala što ga odlikuje kao boljeg držača naspram fleksibilnog magnetnog držača. Ako se sagledaju rezultati mjerenja stabilnosti ticala iz potpoglavlja 5.1 i 5.2 kruti držač je točniji i stabilniji izbor.

Iz rezultata mjerenja metode krutog držača i metode krutog držača pri laserskom pozicioniranju slijedi zaključak da precizno pozicioniranje sustava kao u primjeru laserskog pozicioniranja krutog držača povisuje preciznost sustava, ali ima zanemariv utjecaj na iznos pogreške vođenja i odstupanja od pravocrtnosti granitnog lineala.

### 5.6. Mjerenje odstupanja od pravocrtnosti reverzibilnom metodom separacije pogreške na trokordinatnom mjernom uređaju

Odstupanje od pravocrtnosti reverzibilnom metodom separacije pogreške izmjereno je s trokordinatnim mjernim uređajem. Na trokordinatnom uređaju mjerna metoda može biti ručna ili automatska. U ovom radu napravljena je automatska metoda mjerenja u kojoj mjeritelj postavi sustav, napiše programski kod, a uređaj zatim automatski izvršava mjerenje.



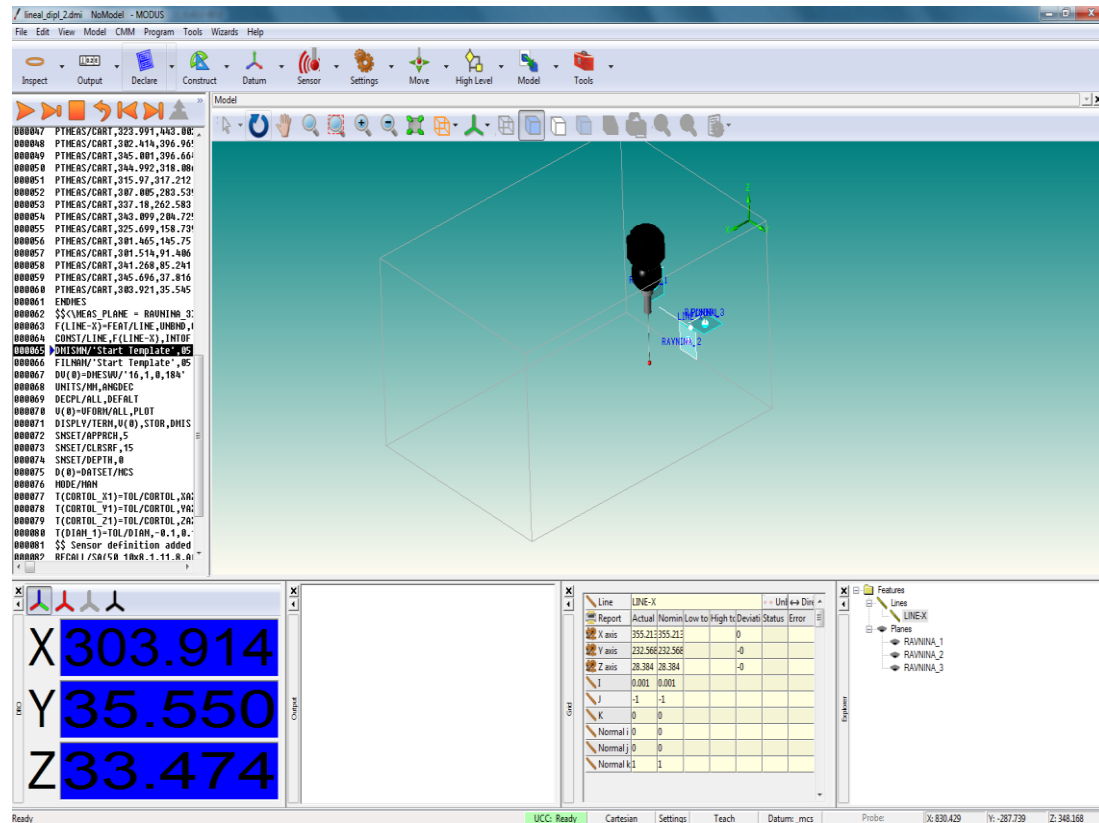
Slika 61. Mjerenje na trokordinatnom mjernom uređaju

Zbog velikih dimenzija granitnog lineala, a ograničenog mjernog prostora trokordinatnog mjernog uređaja, mjerenja su se morala obaviti u dva dijela. Ukupna duljina granitnog lineala veća je od duljine maksimalnog pomaka trokordinatnog mjernog uređaja. Zato trokordinatni mjerni uređaj ne može izmjeriti granitni lineal u komadu, već se mjerenje obavilo u dva segmenta od 0-400 mm i od 400-800 mm, slika 61.

Sva mjerenja obavljena su u laboratorijskoj prostoriji s nadziranom okolinom. U svakom mjerenju mjerilo se 30 točaka na duljini mjerenja od 400 mm.

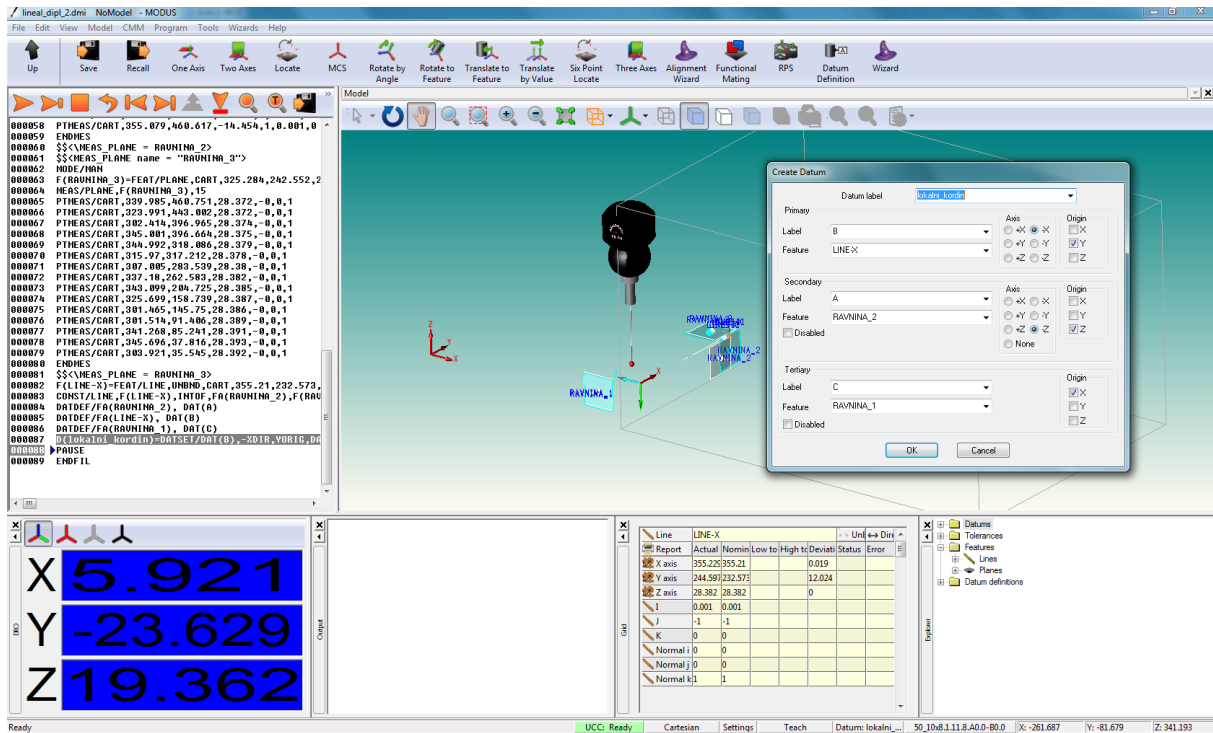
Proizvođač trokordinatnog mjernog uređaja je Ferranti, Merlin. Na trokordinatnom mjernom uređaju montirano je Renishaw-ovo ticalo od rubina ukupne dimenzije 50\_10x8 mm (50 mm karbonski nastavak, 10 mm tijelo ticala i kuglica promjera 8 mm).

Nakon postavljanja granitne ploče na mjernu površinu trokordinatnog mjernog uređaja, napisan je programski kod u zadanom programu Modus, slika 62.



Slika 62. Program „Modus“ trokordinatnog mjernog uređaja

Program je zamišljen da se prilikom svakog pokretanja uređaja prvo odabere osam točaka za x, y i z ravninu mjernog predmeta. Prema tome za svaku poziciju granitnog lineala može se izraditi kordinatni sustav mjernog predmeta i prema njemu izvršiti mjerenje, slika 63. Nakon definiranja kordinatnog sustava mjernog predmeta potrebno je definirati smjer mjerenja i normalu na ravninu mjerenja, te početnu i završnu točku mjerenja (nakon što se ovi podaci jedanput pohrane za zadanu poziciju i orijentaciju više ih ne treba unositi dok se ne promjeni pozicija granitnog lineala).



Slika 63. Definiranje koordinatnog sustava mjernog predmeta

Zatim se izvršava automatsko mjerenje u kojem uređaj sam dolazi u poziciju za mjerenje i izvršava mjerenje. Sva mjerenja su izvršena u pet uzastopnih ponavljanja, odnosno pet mjerenja za duljinu od 0-400 mm te još pet mjerenja u reverznoj orijentaciji za duljinu od 0-400 mm i tako ponovno za duljinu od 400-800 mm.

### 5.6.1. Rezultati mjerenja

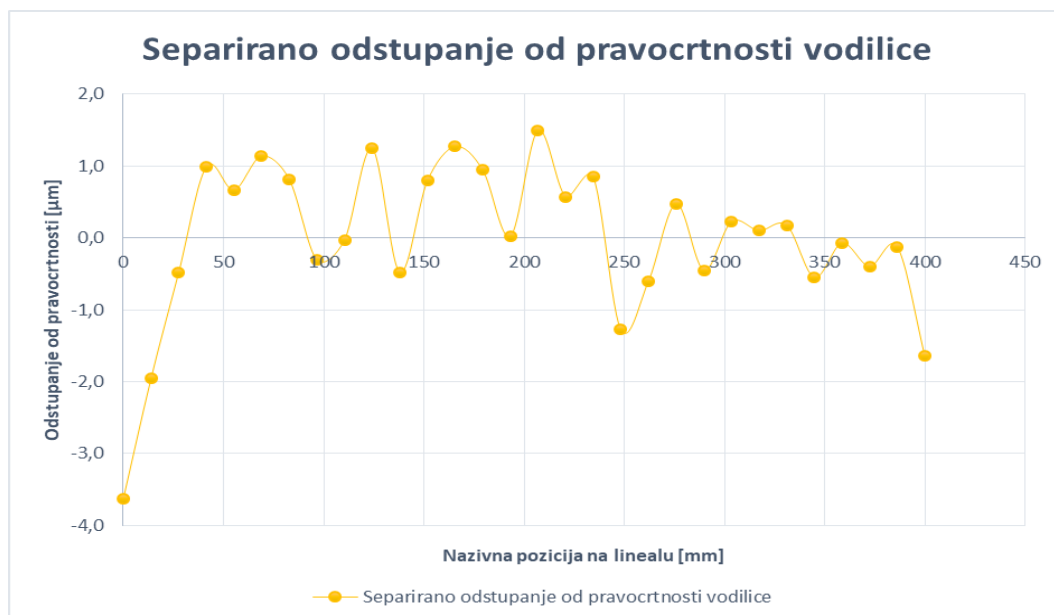
Kao referentni primjer za usporedbu rezultata mjerenja koristila su se mjerenja iz poglavlja 5.4 s laserskim pozicioniranjem na krutom držaču koja su se podijelila u dva segmenta 0-400 mm i 400-800 mm.

Analiza rezultata mjerenja je u potpunosti ista kao i kod ostalih metoda. Rezultati mjerenja prikazani su u tablici 24. i tablici 25.. Važno je istaknuti da trokoordinatni mjerni uređaj mjeri 30 točki po mjerenju, što omogućava detaljniji prikaz mjerenja.

**Tablica 24. Pogreške vođenja i odstupanja od pravocrtnosti granitnog lineala reverzibilnom metodom separacije pogreške na trokordinatnom mjernom uređaju 0-400 mm**

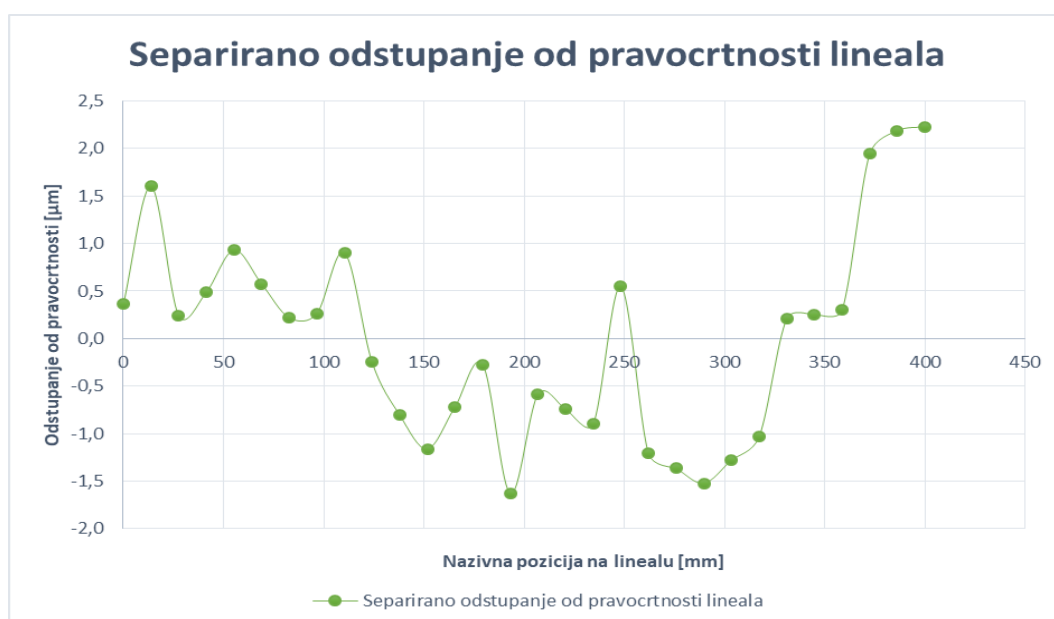
Pozicija mjerenja [mm]	Pogreška vođenja [ $\mu\text{m}$ ]	Pogreška pravocrtnosti [ $\mu\text{m}$ ]
0	-3,6	0,4
14	-2,0	1,6
28	-0,5	0,2
41	1,0	0,5
55	0,7	0,9
69	1,1	0,6
83	0,8	0,2
97	-0,3	0,3
110	0,0	0,9
124	1,2	-0,2
138	-0,5	-0,8
152	0,8	-1,2
166	1,3	-0,7
179	0,9	-0,3
193	0,0	-1,6
207	1,5	-0,6
221	0,6	-0,7
234	0,8	-0,9
248	-1,3	0,5
262	-0,6	-1,2
276	0,5	-1,4
290	-0,4	-1,5
303	0,2	-1,3
317	0,1	-1,0
331	0,2	0,2
345	-0,5	0,3
359	-0,1	0,3
372	-0,4	1,9
386	-0,1	2,2
400	-1,6	2,2

Iz podataka tablice 24. slijedi graf odstupanje od pravocrtnosti vodilice i graf odstupanja od pravocrtnosti granitnog lineala prikazani na slici 64. i 65. Prema rezultatima iz tablice 24. raspon pogreške vođenja iznosi od -3,6  $\mu\text{m}$  do 1,5  $\mu\text{m}$  što znači da odstupanje od pravocrtnosti vodilice reverzibilnom metodom separacije pogreške na trokordinatnom mjernom uređaju iznosi 5,1  $\mu\text{m}$ .



**Slika 64. Separirano odstupanje od pravocrtnosti vodilice 0-400 mm**

Raspon izmjenjenog odstupanja od pravocrtnosti granitnog lineala iznosi od  $-1,6 \mu\text{m}$  do  $2,2 \mu\text{m}$ , što znači da odstupanje od pravocrtnosti granitnog lineala reverzibilnom metodom separacije pogreške na trokoordinatnom mjernom uređaju iznosi  $3,9 \mu\text{m}$ .



**Slika 65. Separirano odstupanje od pravocrtnosti lineala 0-400 mm**

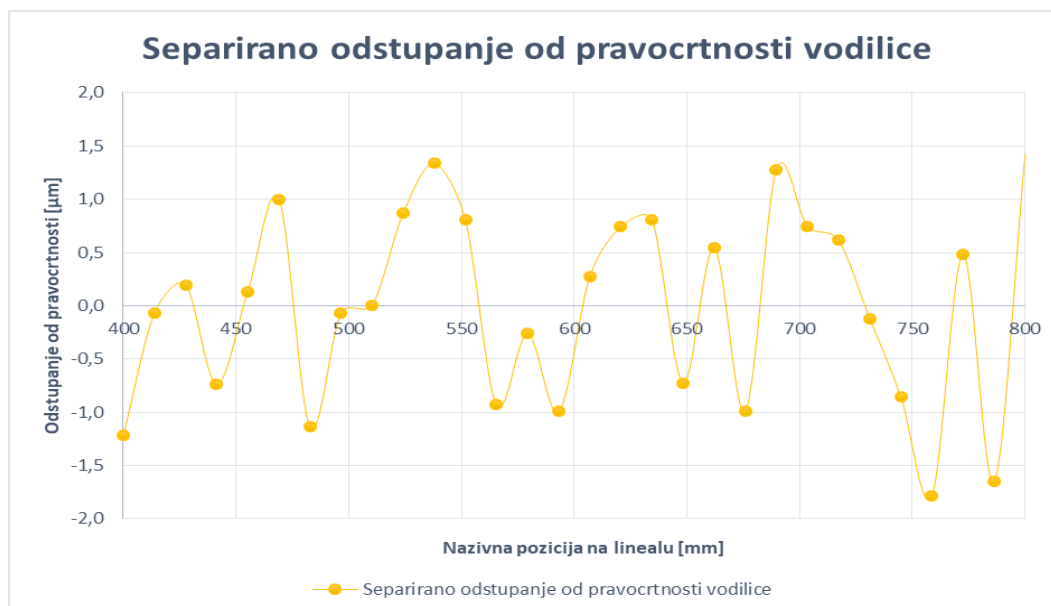
Prilikom rotacije granitnog lineala za reverznu orijentaciju zadržana je ista ravnina mjerenja, jer y os predstavlja odstupanje od pravocrtnosti granitnog lineala koje se mjeri duž x osi, a u ovom slučaju predmet je zarotiran oko y osi tako da je ostala ista ravnina mjerenja odnosno y os se nije pomakla u prostoru.



**Tablica 25. Pogreške vođenja i odstupanja od pravocrtnosti granitnog lineala reverzibilnom metodom separacije pogreške na trokordinatnom mjernom uređaju 400-800 mm**

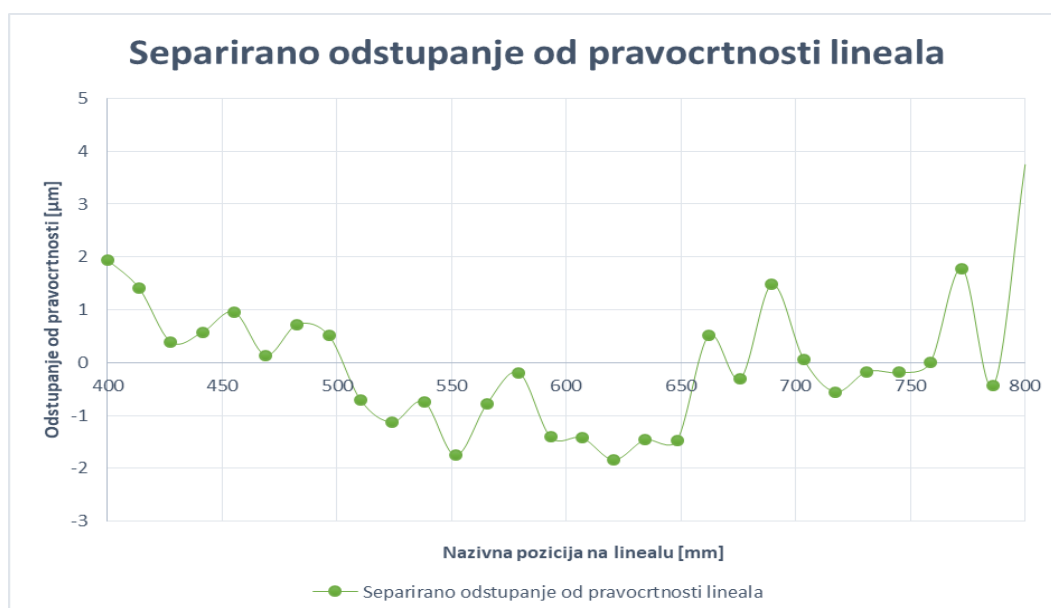
Pozicija mjerenja [mm]	Pogreška vođenja [ $\mu\text{m}$ ]	Pogreška pravocrtnosti [ $\mu\text{m}$ ]
400	-1,2	1,9
414	-0,1	1,4
428	0,2	0,4
441	-0,7	0,6
455	0,1	1,0
469	1,0	0,1
483	-1,1	0,7
497	-0,1	0,5
510	0,0	-0,7
524	0,9	-1,1
538	1,3	-0,7
552	0,8	-1,8
566	-0,9	-0,8
579	-0,3	-0,2
593	-1,0	-1,4
607	0,3	-1,4
621	0,7	-1,8
634	0,8	-1,5
648	-0,7	-1,5
662	0,5	0,5
676	-1,0	-0,3
690	1,3	1,5
703	0,7	0,1
717	0,6	-0,6
731	-0,1	-0,2
745	-0,9	-0,2
759	-1,8	0,0
772	0,5	1,8
786	-1,6	-0,4
800	1,4	3,7

Prema podacima iz tablice 25. slijede dijagram pogreške vođenja i dijagram odstupanja od pravocrtnosti prikazani na slici 66. i slici 67. Prema rezultatima iz tablice 25. raspon pogreške vođenja iznosi od  $-1,8 \mu\text{m}$  do  $1,4 \mu\text{m}$  što znači da odstupanje od pravocrtnosti vodilice reverzibilnom metodom separacije pogreške na trokordinatnom mjernom uređaju iznosi  $3,2 \mu\text{m}$ , slika 66.



**Slika 66. Separirano odstupanje od pravocrtnosti vodilice 400-800 mm**

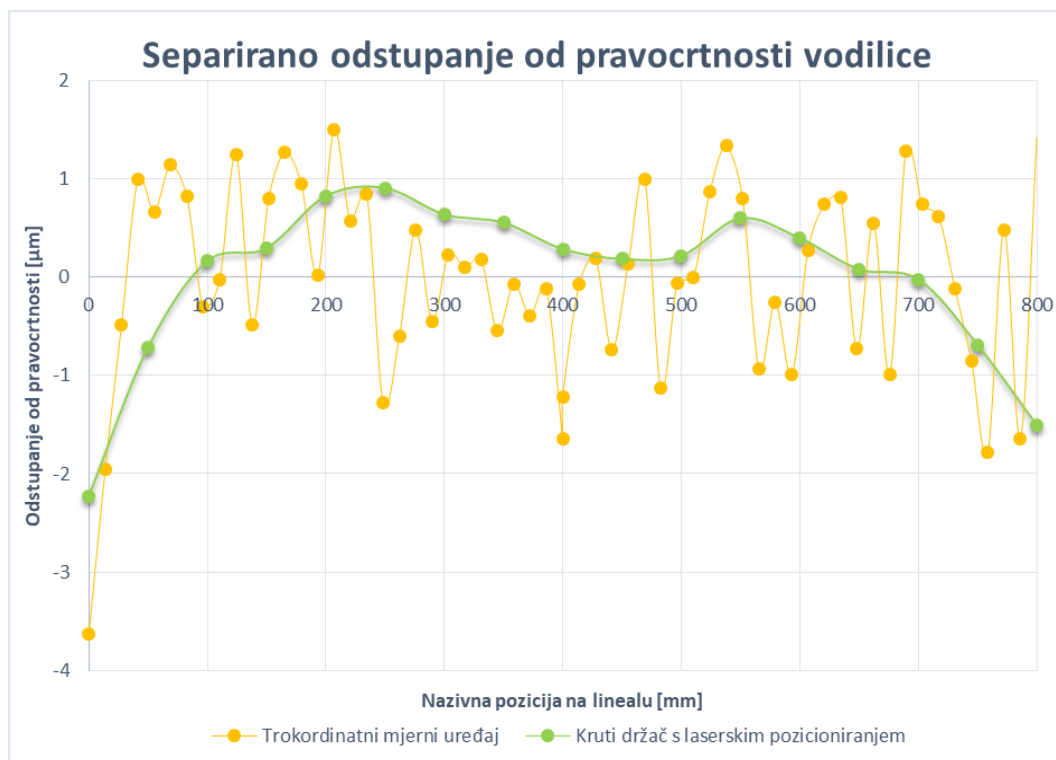
Raspon pogreške pravocrtnosti iznosi od  $-1,8 \mu\text{m}$  do  $3,7 \mu\text{m}$  što znači da odstupanje od pravocrtnosti granitnog lineala reverzibilnom metodom separacije pogreške s trokoordinatnim mjerim uređajem iznosi  $5,6 \mu\text{m}$ . Ovdje je važno istaknuti da odstupanje od pravocrtnosti granitnog lineala oko točke 800 mm skoči na veliku vrijednost od  $3,7 \mu\text{m}$ . Iz dijagram sa slike 67. može se zaključiti da na duljini od 410-790 mm bez vrhova na 400 i 800 mm iznos prosječnog odstupanja od pravocrtnosti granitnog lineala iznosi  $3,3 \mu\text{m}$  što je znatno niže odstupanje u odnosu na  $5,6 \mu\text{m}$ .



**Slika 67. Separirano odstupanje od pravocrtnosti lineala 400-800 mm**

### 5.6.2. Usporedba rezultata mjerenja

Na slici 68. i slici 69. prikazana je usporedba mjerenja separiranog odstupanja od pravocrtnosti vodilice i separiranog odstupanja od pravocrtnosti metode trokordinatnog mjernog uređaja s metodom krutog držača pri laserskom pozicioniranju.

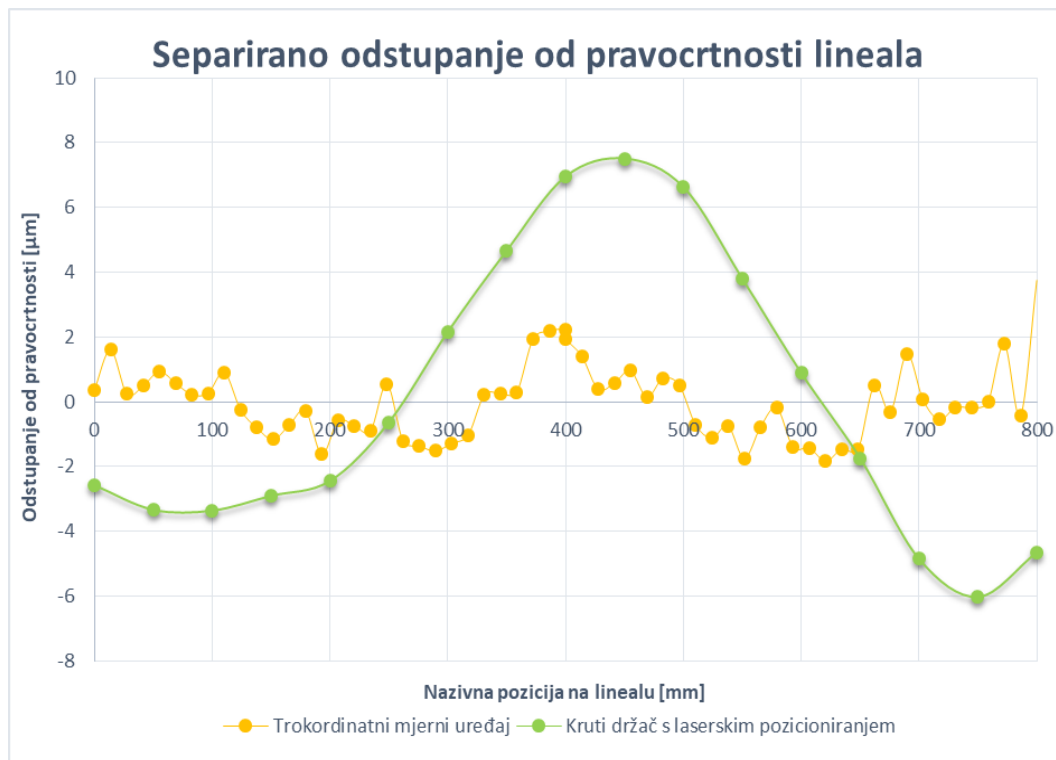


**Slika 68. Usporedba separiranog odstupanja od pravocrtnosti vodilice dvije mjerne metode**

Odstupanja od pravocrtnosti vodilice nema smisla uspoređivati jer se radi o totalno drugačijim vodilicama uređaja.

Dijagram usporedbe rezultata separiranog odstupanja od pravocrtnosti granitnog lineala trokordinatnog mjernog uređaja i krutog držača s laserskim pozicioniranjem prikazan je na slici 69. Raspon rezultata odstupanja od pravocrtnosti granitnog lineala s krutim držačem pri laserskom pozicioniranju puno je veći od raspona rezultata odstupanja od pravocrtnosti granitnog lineala s trokordinatnim mjernim uređajem. Trokordinatni mjerni uređaj trebao bi izmjeriti niže odstupanje od pravocrtnosti granitnog lineala naspram metode krutog držača s laserskim pozicioniranjem zato što mjerenja na trokordinatnom mjernom uređaju izvodi stroj zbog čega se eliminira utjecaj prisutnosti mjeritelja, međutim razlika u rezultatima je velika da bi ovo bio zaključak. Ako se pogledaju rezultati iz potpoglavlja 5.5

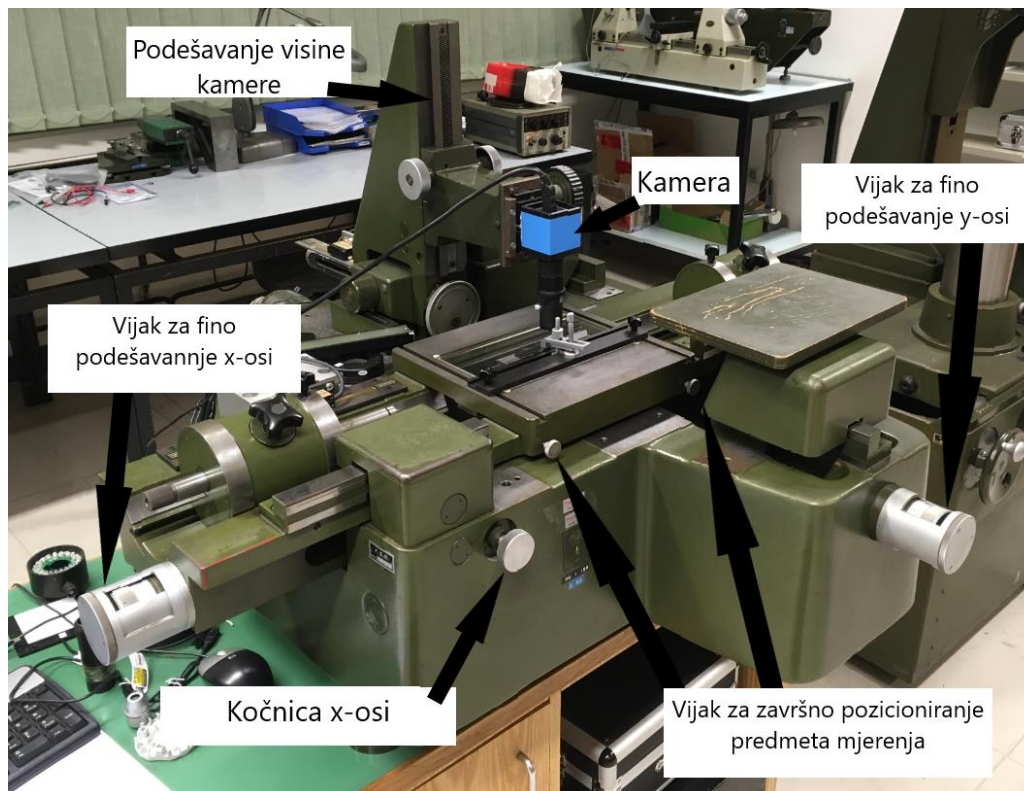
može se primjetiti da su jako slični rezultati mjerenja dva držača u tri različite mjerne metode iz čega se može zaključiti da držači (kruti držač i fleksibilni magnetni držač) nisu dovoljno dobar izbor za slučaj mjerenja odstupanja od pravocrtnosti nižeg od  $10\ \mu\text{m}$ .



Slika 69. Usporedba separiranog odstupanja od pravocrtnosti granitnog lineala dvije mjerne metode

### 5.7. Mjerenje odstupanja od pravocrtnosti reverzibilnom metodom separacije pogreške na alatnom mikroskopu

Alatni mikroskop korišten za potrebe ovog rada je Carl-Zeiss model Jena, modificirani alatni mikroskop koji sadrži kameru, leće i kompjuter za obradu podataka, slika 70. Slika s kamere obrađuje se na računalu u programu RLS MerOpt. Pozicioniranje na alatnom mikroskopu vrši se manualno. Mikroskop sadrži ručno podešavanje x i y osi predmeta mjerenja, visinu kamere, nagiba kamere i fokalnu točku kamere, također alatni mikroskop posjeduje završnom 'fino' podešavanje predmeta mjerenja.



**Slika 70. Prikaz dijelova alatnog mikroskopa**

Na alatnom mikroskopu provesti će se mjerenje odstupanja od pravocrtности metalnog lineala reverzibilnom metode separacije pogreške. Predmet mjerenja je metalni lineal ukupne dužine 150 mm. Metalni lineal pozicioniran je u mjernom području i fiksiran sa metalnim stegama, slika 71.



**Slika 71. Metalni lineal**

### 5.7.1. Rezultati mjerenja

Nakon postavljanja metalnog lineala u mjerno područje alatnog mikroskopa, ishodište mjerenja u programu postavljeno je 2 mm od ruba metalnog lineala. Razlog tome je da se izbjegnemo nepravilnosti rubova.

Predmet mjerenja ručno je pozicioniran na uređaju, a mjerenje se vrši u računalnom programu pritiskom na tipku za mjerenje. Mjerilo se svakih 15 mm, a mjerenja u početnoj i reverznoj orijentaciji napravljena su u tri uzastopna ponavljanja. Proces analize rezultata isti je kao i kod ostalih metoda pa se nije posebno objašnjavalo.

Rezultati mjerenja na alatnom mikroskopu reverzibilnom metodom separacije pogreške prikazani su u tablici 26.

**Tablica 26. Mjerenje alatnim mikroskopom**

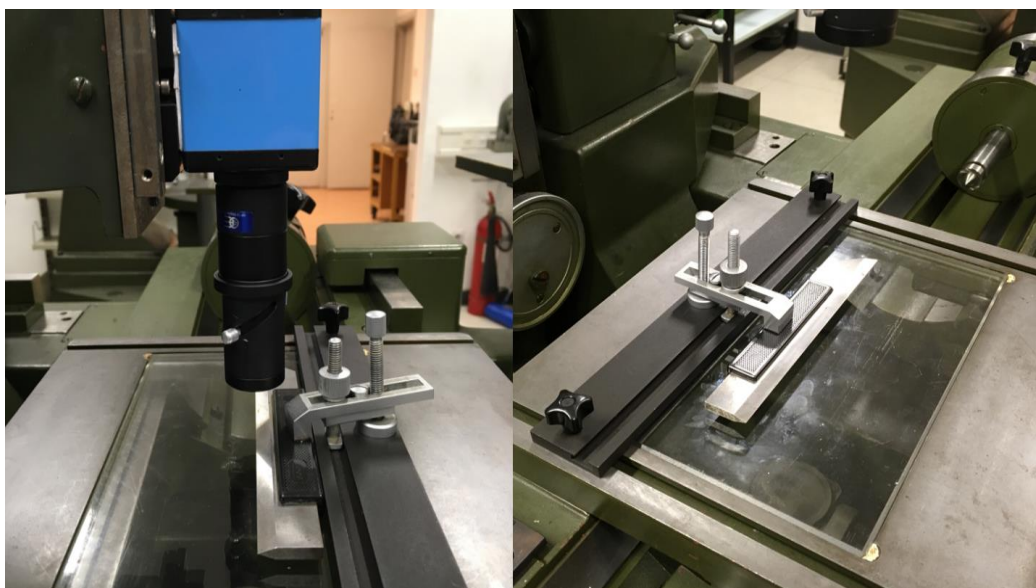
Pozicija mjerenja [mm]	1. Mjerenje	2. Mjerenje	3. Mjerenje
0	0,0	0,0	0,0
5	-2,4	0,2	-0,8
10	-3,8	-2,3	-2,7
15	-1,6	-3,2	-1,0
20	-2,4	-2,1	-2,2
25	-1,1	-3,1	-1,5
30	-4,3	-1,7	-3,4
35	-1,6	-2,2	-2,0
40	-0,7	-2,6	-2,4
45	-1,6	-0,2	-0,3
50	-2,0	-1,3	-0,7
55	-1,5	-2,5	-1,9
60	-2,2	-3,5	-3,6
65	-2,9	-2,9	-2,2
70	-4,6	-3,0	-3,5
75	-2,6	-1,0	-2,3
80	-2,8	-3,5	-2,2
85	-1,0	-2,0	-1,2
90	-2,3	-4,1	-0,7
95	-1,2	-3,5	-1,4
100	-2,2	-4,0	-3,3

Pozicija mjerenja [mm]	1. Mjerenje	2. Mjerenje	3. Mjerenje
105	-4,4	-4,5	-4,3
110	-4,7	-2,6	-1,5
115	-3,2	-3,9	-3,8
120	-1,7	-1,3	-0,7
125	-2,4	-2,2	-4,1
130	-3,8	-2,4	-2,2
135	-2,8	-3,1	-3,4
140	-0,4	-2,0	-1,9
145	-1,4	-1,0	1,4

Nakon mjerenja potrebno je izračunati vrijednosti nagiba pravca i odsječka pravca najmanjih kvadrata za svako mjerenje, tablica 27.

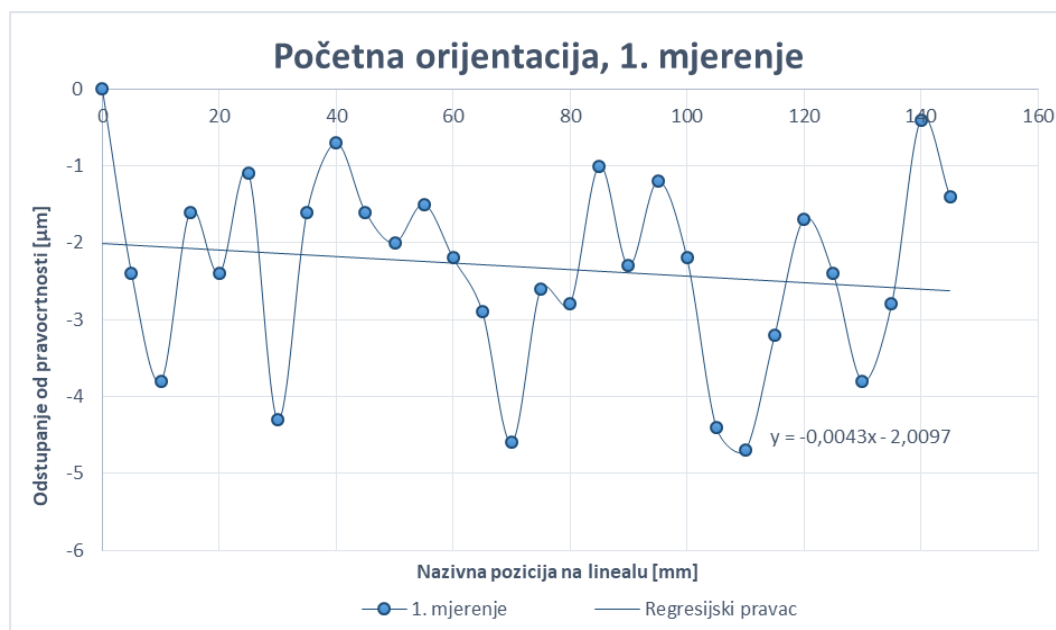
**Tablica 27. Nagib pravca i odsječak pravca za mjerenje krutim držačem**

	1. Mjerenje	2. Mjerenje	3. Mjerenje
Nagib pravca:	-0,004280	-0,008503	-0,004476
Odsječak pravca:	-2,009670	-1,766878	-1,668810



**Slika 72. Orijehtacije metalnog lineala**

Na slici 73. prikazan je dijagram početne orijentacije, 1. mjerenja iz tablice 26. te je označen regresijski pravac.



Slika 73. Odstupanje od pravocrtnosti - početna orijentacija 1. mjerenje

Iako je metalni lineal pričvršćen stegama, mali pomaci i nesuosnosti su neizbježne pa je izmijernim podacima potrebno eliminirati nesuosnost metodom najmanjih kvadrata, tablica 28.

Tablica 28. Metoda najmanjih kvadrata za mjerenja na alatnom mikroskopu

Pozicija mjerenja [mm]	1. Mjerenje	2. Mjerenje	3. Mjerenje	Prosječna vrijednost
0	2,01	1,77	1,67	1,82
5	-0,37	2,01	0,89	0,84
10	-1,75	-0,45	-0,99	-1,06
15	0,47	-1,31	0,74	-0,03
20	-0,30	-0,16	-0,44	-0,30
25	1,02	-1,12	0,28	0,06
30	-2,16	0,32	-1,60	-1,15
35	0,56	-0,14	-0,17	0,08
40	1,48	-0,49	-0,55	0,15
45	0,60	1,95	1,57	1,37
50	0,22	0,89	1,19	0,77
55	0,75	-0,27	0,02	0,16
60	0,07	-1,22	-1,66	-0,94
65	-0,61	-0,58	-0,24	-0,48
70	-2,29	-0,64	-1,52	-1,48
75	-0,27	1,40	-0,30	0,28



Pozicija mjerenja [mm]	1. Mjerenje	2. Mjerenje	3. Mjerenje	Prosječna vrijednost
80	-0,45	-1,05	-0,17	-0,56
85	1,37	0,49	0,85	0,90
90	0,09	-1,57	1,37	-0,03
95	1,22	-0,93	0,69	0,33
100	0,24	-1,38	-1,18	-0,78
105	-1,94	-1,84	-2,16	-1,98
110	-2,22	0,10	0,66	-0,49
115	-0,70	-1,16	-1,62	-1,16
120	0,82	1,49	1,51	1,27
125	0,14	0,63	-1,87	-0,37
130	-1,23	0,47	0,05	-0,24
135	-0,21	-0,19	-1,13	-0,51
140	2,21	0,96	0,40	1,19
145	1,23	2,00	3,72	2,32

Slika 74. prikazuje dijagram korigirane nesuosnosti prosječnih vrijednosti početne orijentacije dobivenih nakon provedbe metode najmanjih kvadrata iz tablice 28.

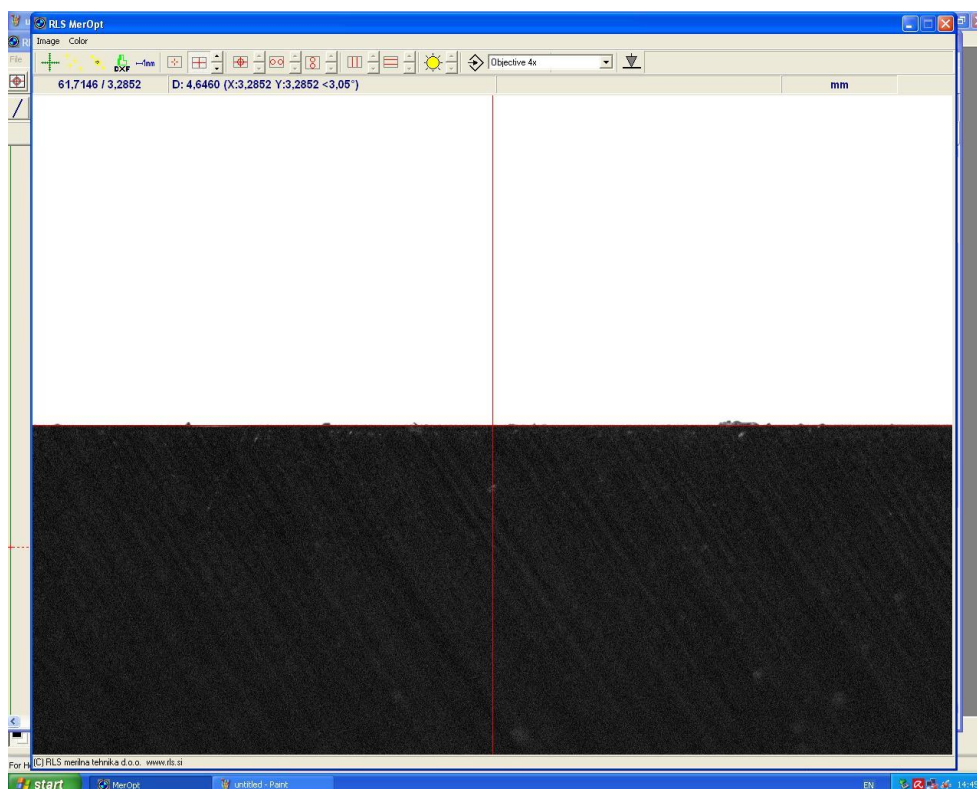


**Slika 74. Odstupanje od pravocrtnosti - početna orijentacija, korigirana nesuosnost prosječna vrijednost**

Reverzibilna metoda separacije pogreške zahtjeva da se metalni lineal zarotira kao na slici 28. za  $180^\circ$  oko osi mjerenja. Orijentacije metalnog lineala prikaze su na slici 72.

Metalni lineal zarotiran je za  $180^\circ$  uz pomoć računalnog programa MerOpt tako što se pozicioniranje metalnog lineala obavilo prema slici kamere na monitoru računala, slika 75. gdje crni objekt predstavlja metalni lineal, a bijela površina je alatni mikroskop. Bitno je istaknuti da se y-os alatnog mikroskopa nije mijenjala tijekom rotacije metalnog lineala čime se zadržala ista os mjerenja. Da bi postigli kontrast kao na slici 75. predmet mjerenja osvijetljen je s postojećim svjetlom na alatnom mikroskopu koje se nalazi ispod predmeta mjerenja, dok je iznad predmeta mjerenja postavljen improviziran predmet tako da drugi izvori svjetlosti ne narušavaju sliku.

Reverzno mjerenje obavljeno je u tri uzastopna mjerenja, tablica 29.



Slika 75. Računalni program MerOpt

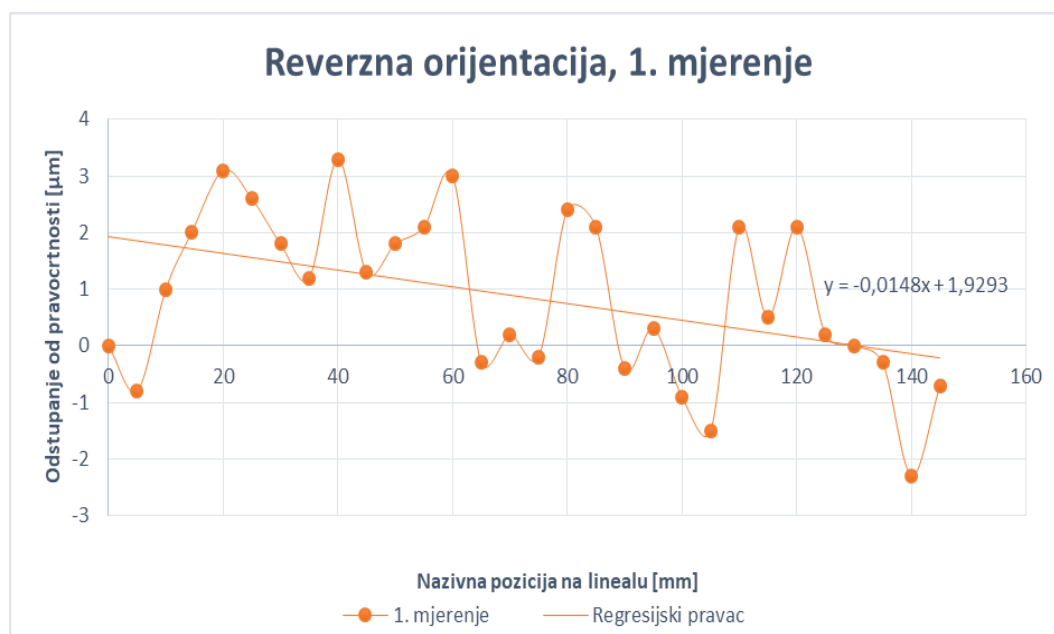
Tablica 29. Mjerenje alatnim mikroskopom u reverznoj orijentaciji

Pozicija mjerenja [mm]	1. Mjerenje	2. Mjerenje	3. Mjerenje	Prosječna vrijednost
0	2,01	1,77	1,67	1,82
5	-0,37	2,01	0,89	0,84
10	-1,75	-0,45	-0,99	-1,06
15	0,47	-1,31	0,74	-0,03
20	-0,30	-0,16	-0,44	-0,30
25	1,02	-1,12	0,28	0,06
30	-2,16	0,32	-1,60	-1,15
35	0,56	-0,14	-0,17	0,08
40	1,48	-0,49	-0,55	0,15
45	0,60	1,95	1,57	1,37
50	0,22	0,89	1,19	0,77
55	0,75	-0,27	0,02	0,16
60	0,07	-1,22	-1,66	-0,94
65	-0,61	-0,58	-0,24	-0,48
70	-2,29	-0,64	-1,52	-1,48
75	-0,27	1,40	-0,30	0,28
80	-0,45	-1,05	-0,17	-0,56
85	1,37	0,49	0,85	0,90
90	0,09	-1,57	1,37	-0,03
95	1,22	-0,93	0,69	0,33
100	0,24	-1,38	-1,18	-0,78
105	-1,94	-1,84	-2,16	-1,98
110	-2,22	0,10	0,66	-0,49
115	-0,70	-1,16	-1,62	-1,16
120	0,82	1,49	1,51	1,27
125	0,14	0,63	-1,87	-0,37
130	-1,23	0,47	0,05	-0,24
135	-0,21	-0,19	-1,13	-0,51
140	2,21	0,96	0,40	1,19
145	1,23	2,00	3,72	2,32

Vrijednosti nagiba pravca i odsječka pravca najmanjih kvadrata za reverznu orijentaciju metalnog lineala prikazani su u tablica 30.

**Tablica 30. Nagib pravca i odsječak pravca za mjerenje krutim držačem**

	1. Mjerenje	2. Mjerenje	3. Mjerenje
Nagib pravca:	-0,014798	-0,062859	-0,031472
Odsječak pravca:	1,929285	2,682875	0,234509

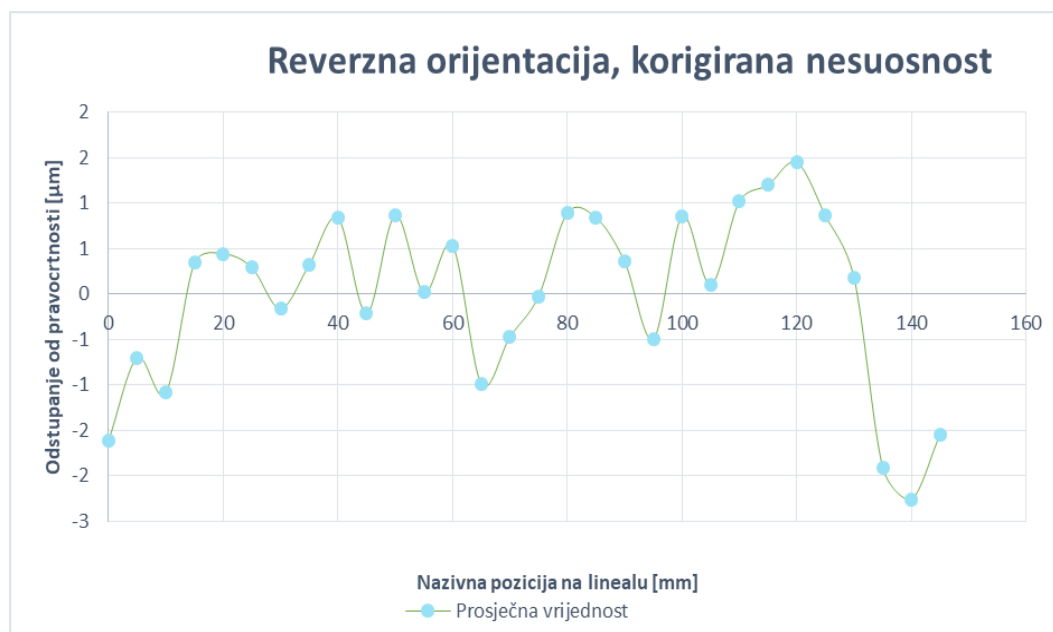
**Slika 76. Odstupanje od pravocrtosti - reverzna orijentacija, 1. mjerenje**

Na slici 76. prikazan je dijagram reverzne orijentacije 1. mjerenja iz tablice 29. i označen je regresijski pravac. Vrijednosti metode najmanjih kvadrata za reverznu orijentaciju metalnog lineala prikazane su u tablici 31.

**Tablica 31. Metoda najmanjih kvadrata za reverznu orijentaciju na alatnom mikroskopu**

Pozicija mjerenja [mm]	1. Mjerenje	2. Mjerenje	3. Mjerenje	Prosječna vrijednost
0	-1,93	-2,68	-0,23	-1,62
5	-2,66	1,73	-1,18	-0,70
10	-0,78	-0,45	-2,02	-1,09
15	0,29	1,33	-0,58	0,35
20	1,47	0,07	-0,21	0,45
25	1,04	1,09	-1,25	0,29
30	0,31	-0,20	-0,59	-0,16
35	-0,21	-0,28	1,47	0,32
40	1,96	-0,07	0,62	0,84
45	0,04	-0,65	-0,02	-0,21
50	0,61	0,76	1,24	0,87

Pozicija mjerenja [mm]	1. Mjerenje	2. Mjerenje	3. Mjerenje	Prosječna vrijednost
55	0,98	-1,53	0,60	0,02
60	1,96	0,09	-0,45	0,53
65	-1,27	-0,80	-0,89	-0,98
70	-0,69	0,12	-0,83	-0,47
75	-1,02	0,53	0,43	-0,02
80	1,65	0,35	0,68	0,89
85	1,43	-1,04	2,14	0,84
90	-1,00	-0,23	2,30	0,36
95	-0,22	-1,11	-0,14	-0,49
100	-1,35	0,80	3,11	0,86
105	-1,88	0,42	1,77	0,10
110	1,80	0,93	0,33	1,02
115	0,27	1,55	1,78	1,20
120	1,95	0,86	1,54	1,45
125	0,12	1,87	0,60	0,86
130	-0,01	1,19	-0,64	0,18
135	-0,23	0,70	-6,19	-1,90
140	-2,16	-2,28	-2,33	-2,26
145	-0,48	-3,07	-1,07	-1,54



**Slika 77. Odstupanje od pravocrtosti - reverzna orijentacija, korigirana nesuosnost prosječna vrijednost**

Slika 77. prikazuje dijagram korigirane nesuosnosti prosječnih vrijednosti za reverznu orijetnaciju dobivenih provedbom metode najmanjih kvadrata iz tablice 31.

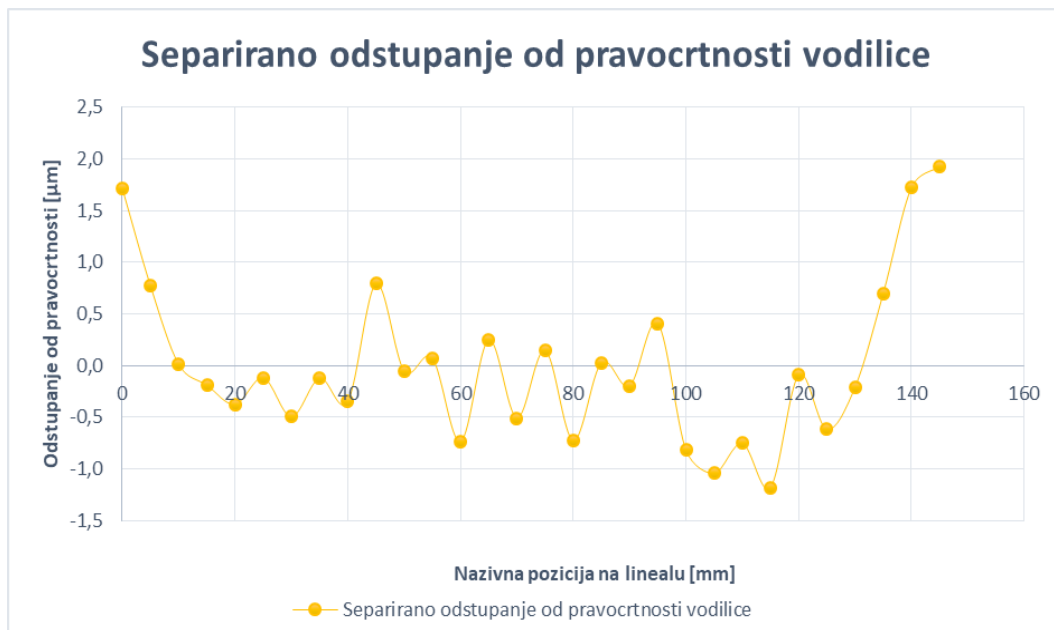
Iz tablica 28. i tablica 31. slijede rezultati separiranog odstupanja od pravocrtnosti vodilice i separiranog odstupanja od pravocrtnosti metalnog lineala tablica 32.

**Tablica 32. Pogreške vođenja i odstupanja od pravocrtnosti metalnog lineala reverzibilnom metodom separacije pogreške na alatnom mikroskopu**

Pozicija mjerenja [mm]	Pogreška vođenja [ $\mu\text{m}$ ]	Pogreška pravocrtnosti [ $\mu\text{m}$ ]
0	1,7	0,1
5	0,8	0,1
10	0,0	-1,1
15	-0,2	0,2
20	-0,4	0,1
25	-0,1	0,2
30	-0,5	-0,7
35	-0,1	0,2
40	-0,3	0,5
45	0,8	0,6
50	-0,1	0,8
55	0,1	0,1
60	-0,7	-0,2
65	0,3	-0,7
70	-0,5	-1,0
75	0,2	0,1
80	-0,7	0,2
85	0,0	0,9
90	-0,2	0,2
95	0,4	-0,1
100	-0,8	0,0
105	-1,0	-0,9
110	-0,8	0,3
115	-1,2	0,0
120	-0,1	1,4
125	-0,6	0,2
130	-0,2	0,0
135	0,7	-1,2
140	1,7	-0,5
145	1,9	0,4

Prema podacima iz tablice 32. vidimo da raspon separiranog odstupanja od pravocrtnosti vodilice iznosi od  $-0,5 \mu\text{m}$  do  $1,7 \mu\text{m}$  što znači da odstupanja od pravocrtnosti

vodilice reverzibilnom metodom separacije pogreške na alatnom mikroskopu iznosi 2,2  $\mu\text{m}$  slika 78.



Slika 78. Separirano odstupanje od pravocrtnosti vodilice

Raspon odstupanja od pravocrtnosti metalnog lineala iznosi od -1,1  $\mu\text{m}$  do 0,6  $\mu\text{m}$ , što znači da odstupanje od pravocrtnosti metalnog lineala reverzibilnom metodom separacije pogreške na alatnom mikroskopu iznosi 1,7  $\mu\text{m}$ , slika 79.



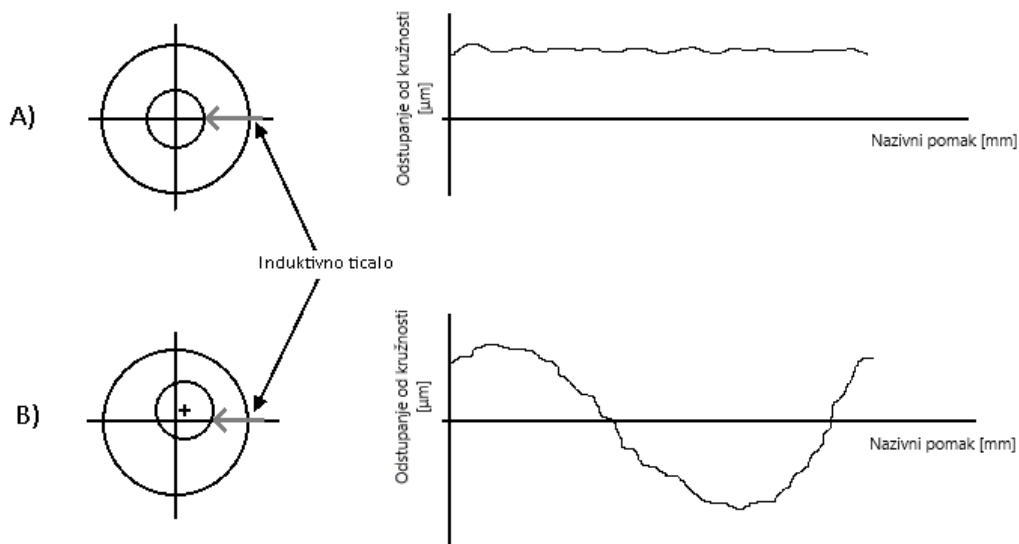
Slika 79. Separirano odstupanje od pravocrtnosti metalnog lineala

Ovim mjerenjem dokazana je primjenjivost reverzibilne metode separacije pogreške na alatnom mikroskopu s beskontaktnim sustavom mjerenja, što je razlika od svih prethodnih mjerenja koja su bila kontaktna mjerenja jer su sadržala mjerno ticalo.

### 5.8. Mjerenje odstupanja od kružnosti

U prethodnim mjerenjima pokazana je primjenjivost reverzibilne metode separacije pogreške na različitim mjernim metodama za računanje odstupanja od pravocrtnosti. Unutar ovog poglavlja pokazat će se primjenjivost reverzibilne metode separacije pogreške za mjerenje odstupanja od kružnosti.

Za mjerenje odstupanja od kružnosti primijenit će se ista metoda kao i za mjerenje odstupanja od pravocrtnosti. Rezultati mjerenja odstupanja od kružnosti 'razvuku' se u ravnu liniju pa se analizi odstupanja od kružnosti pristupa kao analizi odstupanja od pravocrtnosti. Rezultati mjerenja odstupanja od kružnosti obradit će se istom metodom koja se koristila za obradu odstupanja od pravocrtnost, odnosno koristiti će se pravac kao funkcija koja se optimira metodom najmanjih kvadrata, a ne kružnica kao funkcija koja je uobičajena metoda u slučaju analize odstupanja od kružnosti. Na kraju poglavlja prikazat će se usporedba rezultata ova dva pristupa.



Slika 80. Primjer idealnog centriranja (A) i lošeg centriranja (B)

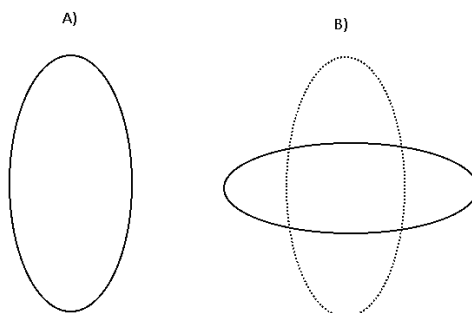


U realnim uvjetima predmet mjerenja gotovo je nemoguće idealno centrirati na okretni stol mjernog uređaja pa se pojavljuje nesuosnost osi predmeta mjerenja s osi rotacije mjernog uređaja. Problem je što se nesuosnost osi predmeta mjerenja s osi rotacije mjernog uređaja manifestira kao rezultat odstupanja od kružnosti predmeta mjerenja, slika 80.

U primjeru prikazanom na slici 80. pretpostavlja se da je predmet mjerenja gotovo idealan što znači da je odstupanje od kružnosti blizu nula. Ako je predmet mjerenja idealno centriran kao što je prikazano na slici 80. A) rezultat mjerenja je odstupanje od kružnosti predmeta mjerenja. Međutim ako predmet mjerenja nije idealno centriran kao na slici 80. B) rezultat odstupanje od kružnosti osim odstupanja od kružnosti predmeta mjerenja sadrži i pogrešku ekscentra.

Problem nesuosnosti osi predmeta mjerenja i osi rotacije mjernog uređaja može se riješiti idealnim centriranjem predmeta mjerenja, eliminacijom centra rotacije numeričkom metodom da se umjesto linearne funkcije regresije koristi funkcija sinus, ili harmonijskom analizom tako da se rezultate Fourierovom transformacijom prebaci u frekvencijsko područje unutar kojeg se onda filtrira ekscentričnost. Međutim, da bi na ovaj način riješili problem nesuosnosti moramo biti sigurni da profil predmeta mjerenja ne sadrži eliptično odstupanje od kružnosti.

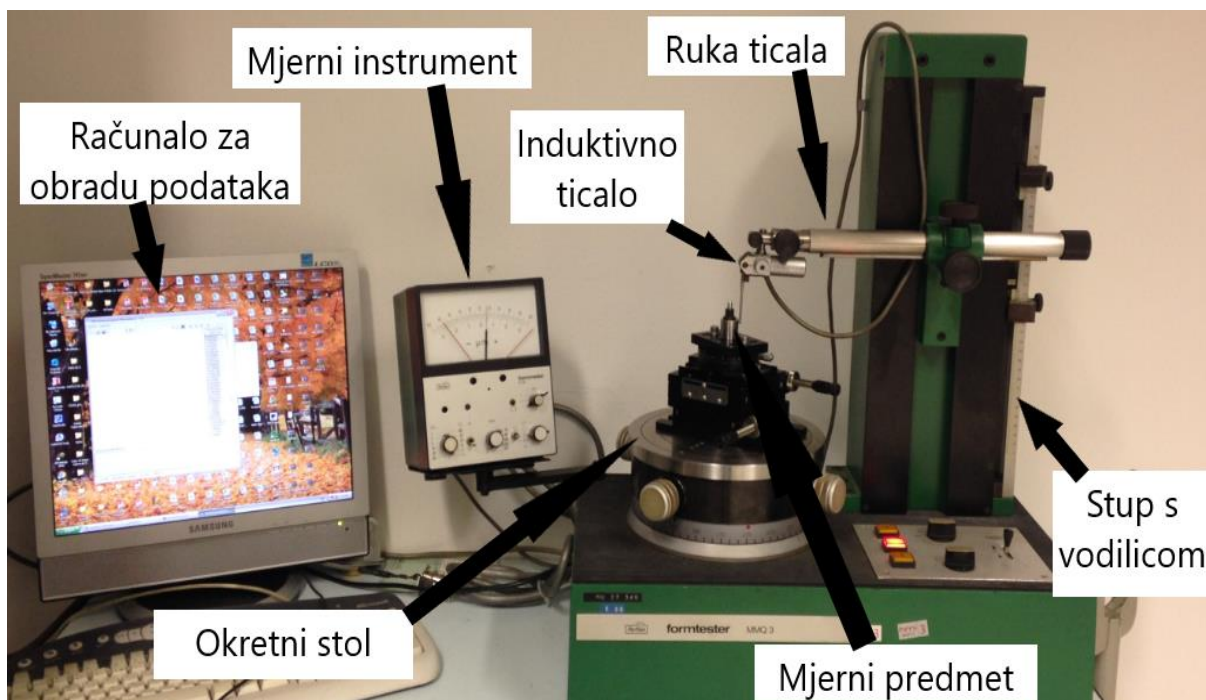
Jedan od mogućih postupaka provjere da li predmet mjerenja sadrži eliptično odstupanje od kružnosti je sljedeći. Predmet mjerenja se izmjeri i dobije se polarni graf mjerenja koji bi izgledao kao na slici 81. A), zatim se predmet mjerenja zarotira za  $90^\circ$  i ukoliko je os elipse jednako orijentirana kao u prethodnom mjerenju slika 81. B) (iscrtkana elipsa) onda se može pretpostaviti da je odstupanje rezultat nesuosnosti osi vrtnje i osi predmeta. Ako nakon zakretanja mjernog predmeta za  $90^\circ$  rezultat mjerenja bude elipsa zaokrenuta za  $90^\circ$ , onda se može pretpostaviti da je odstupanje od kružnosti predmeta mjerenja eliptičnog oblika.



**Slika 81. Predmeta mjerenja s eliptičnim odstupanjem od kružnosti**

Tek kad se zna da oblik predmeta mjerenja sadrži eliptično odstupanje od kružnosti može se započeti postupak eliminacije ekscentričnosti.

Odstupanje od kružnosti izmjerit će se reverzibilnom metodom separacije pogreške na Mahr-ovom MMQ3 mjernom uređaju na cilindričnom predmetu kao na slici 82. i na etalonu kružnosti za koji je eksternim umjeravanjem utvrđeno odstupanje od kružnosti na razini 15 nm.



Slika 82. Sustav za mjerenje odstupanja od kružnosti

Cilindrični mjerni predmet ručno je pozicioniran i centriran na okretnom stolu. Mahr MMQ3 uređaj sadrži dva precizna vijka za pozicioniranje (translaciju) mjernog predmeta u  $x$  i  $y$  ravnini okretnog stola i dva precizna vijka za podešavanje nagiba okretnog stola oko  $x$  i  $y$  osi.

Reverzibilna metoda separacije pogreške zahtjeva da se predmet mjerenja zarotira za  $180^\circ$  i da se točka mjerenja induktivnim ticalom premjesti za  $180^\circ$ . Predmet mjerenja zarotiran je za  $180^\circ$  korištenjem sustava za preciznu rotaciju. Na okretni stol Mahr MMQ3 uređaja morala su se postaviti dva sustava za preciznu translaciju kako bi se sustav za preciznu rotaciju mogao postaviti na okretni stol i osigurati od neželjenih pomaka tijekom mjerenja, slika 82. Induktivno ticalo ima mogućnost pomicanja u horizontalnom i vertikalnom smjeru. Na ruci ticala nalazi se vijak za fino pomicanje induktivnog ticala u horizontalnom smjeru, dok se pomicanje u vertikalnom smjeru može izvršiti ručno ili električnim motorom.

Vertikalno pomicanje nam omogućuje mjerenje odstupanja od kružnosti na različitim visinama mjernog predmeta.

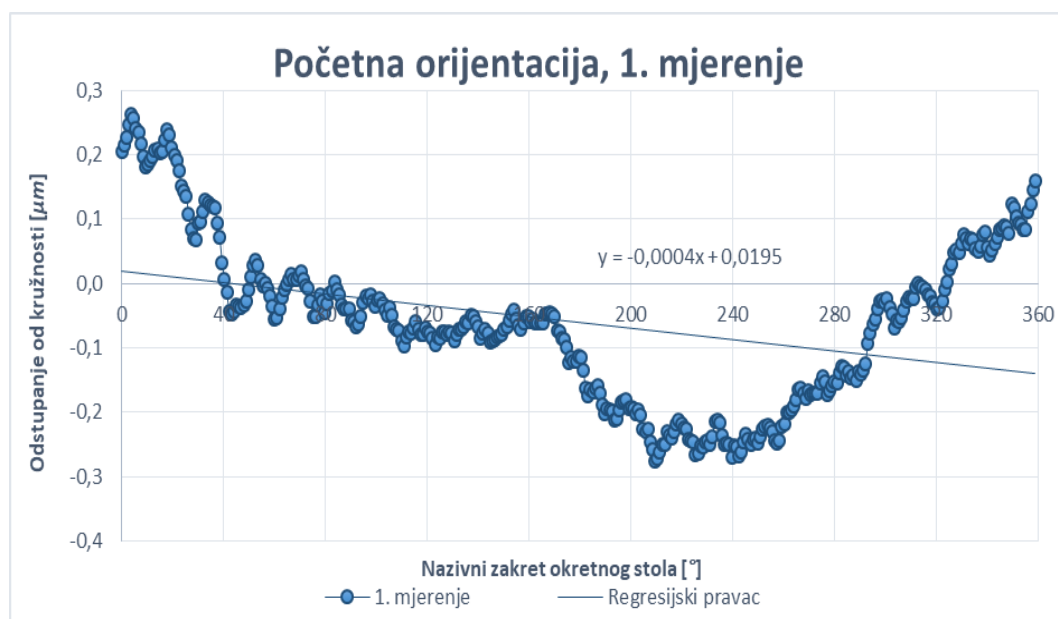
Centriranja mjernog predmeta izvršava se tako što se konstantno ispravlja vrijednost očitana s analognog mjernog instrumenta. Analogni mjerni instrument ima mjerno područje u rasponu od  $\pm 3 \mu\text{m}$  do  $\pm 1000 \mu\text{m}$ , u redosljedu  $\pm 1000 \mu\text{m}$ ,  $\pm 300 \mu\text{m}$ ,  $\pm 100 \mu\text{m}$ ,  $\pm 30 \mu\text{m}$ ,  $\pm 10 \mu\text{m}$  i  $\pm 3 \mu\text{m}$ . Prvo se mjerni predmet centrira vijcima za translaciju u  $x$  i  $y$  ravninu, a potom vijcima za nagib osi. Fino centriranje se počne iz najvećeg mjernog područja, pa se mjerno područje smanji i postupak se ponavlja dok god mjerni predmet može 'ući' u sljedeće niže mjerno područje.

### 5.8.1. Rezultati mjerenja

Prije početka mjerenja potrebno je unutar računalnog programa odabrati mjerno područje i broj točaka mjerenja. U ovom mjerenju mjerno područje iznosi  $\pm 3 \mu\text{m}$ , a broj točaka mjerenja za 360 stupnjeva je 384 točke, odnosno mjeri se svakih  $0,938^\circ$ .

Analiza rezultata mjerenja ista je kao u prethodnim mjerenjima. Izmjerenim podacima mora se odrediti nagib pravca i odsječak pravca kako bi se mogla eliminirati nesuosnost primjenom metode najmanjih kvadrata.

Na slici 83. prikazan je dijagram početne orijentacije, 1. mjerenja odstupanja od kružnosti te je označen regresijski pravac.



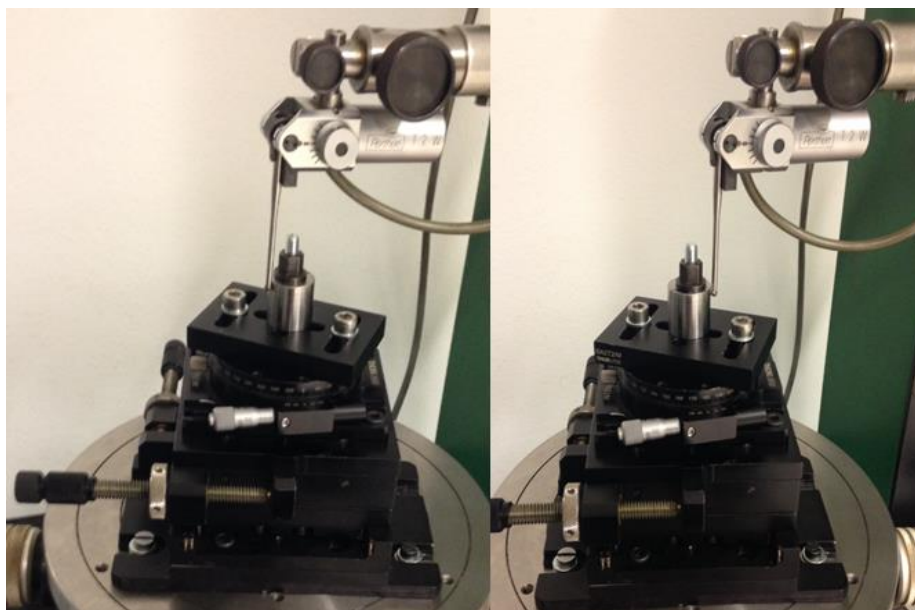
Slika 83. Odstupanje od kružnosti - početna orijentacija, 1. mjerenje

Slika 84. prikazuje dijagram prosječnih vrijednosti početne orijentacije dobivenih nakon provedbe metode najmanjih kvadrata.



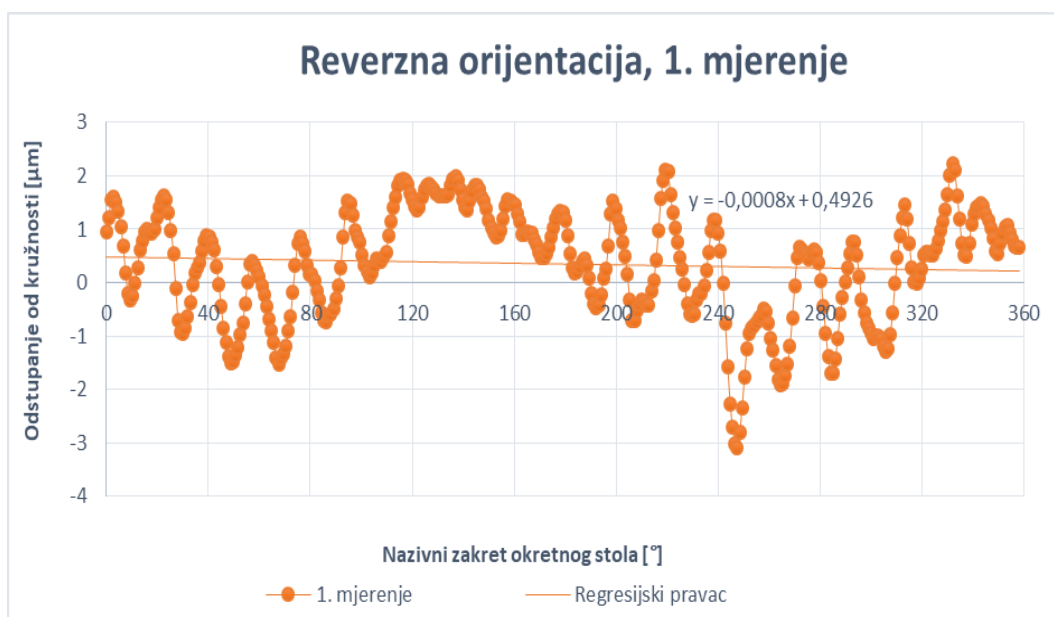
**Slika 84. Odstupanje od kružnosti - početna orijentacija, prosječna vrijednost**

Kako bi se mogla primijeniti reverzibilna metoda separacije pogreške predmet mjerenja mora se izmjeriti zarotiran za  $180^{\circ}$ , odnosno potrebno je zarotirati predmet mjerenja za  $180^{\circ}$  i premjestiti točku mjerenja induktivnog ticala za  $180^{\circ}$ , slika 85. Predmet mjerenja zarotiran je za  $180^{\circ}$  korištenjem sustava za preciznu rotaciju. Stup vodilice na kojoj se nalazi ruka ticala sadrži označenu skalu pomaka visine. Na stupu vodilice graničnikom je označena visina mjerenja u prvoj orijentaciji, nakon premještanja pozicije induktivno ticalo spuštено je do visine graničnika koji osiguravao istu visinu mjerenja. Ovakvom metodom premještanja zadržali smo istu visinu mjerenja odstupanja od kružnosti.



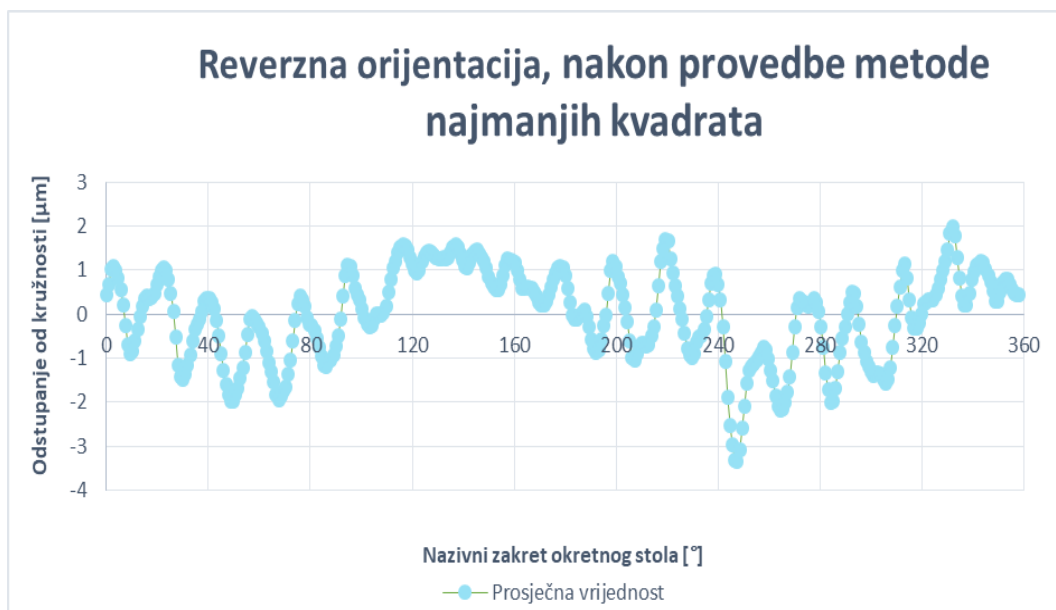
Slika 85. Usporedba početne i reverzne orijentacije mjerenja odstupanja od kružnosti

Na slici 86. prikazan je dijagram reverzne orijentacije, 1. mjerenja odstupanja od kružnosti te je označen regresijski pravac.



Slika 86. Odstupanje od kružnosti- reverzna orijentacija, 1. mjerenje

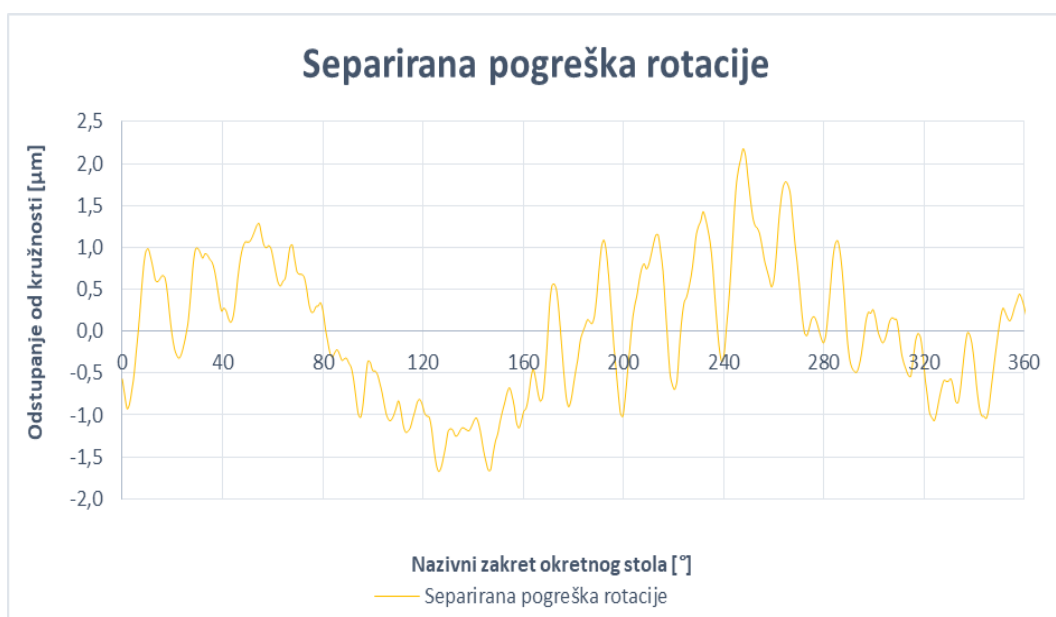
Slika 87. prikazuje dijagram prosječnih vrijednosti za reverznu orijentaciju dobivenih nakon provedbe metode najmanjih kvadrata.



**Slika 87. Odstupanje od kružnosti - reverzna orijentacija, prosječna vrijednost**

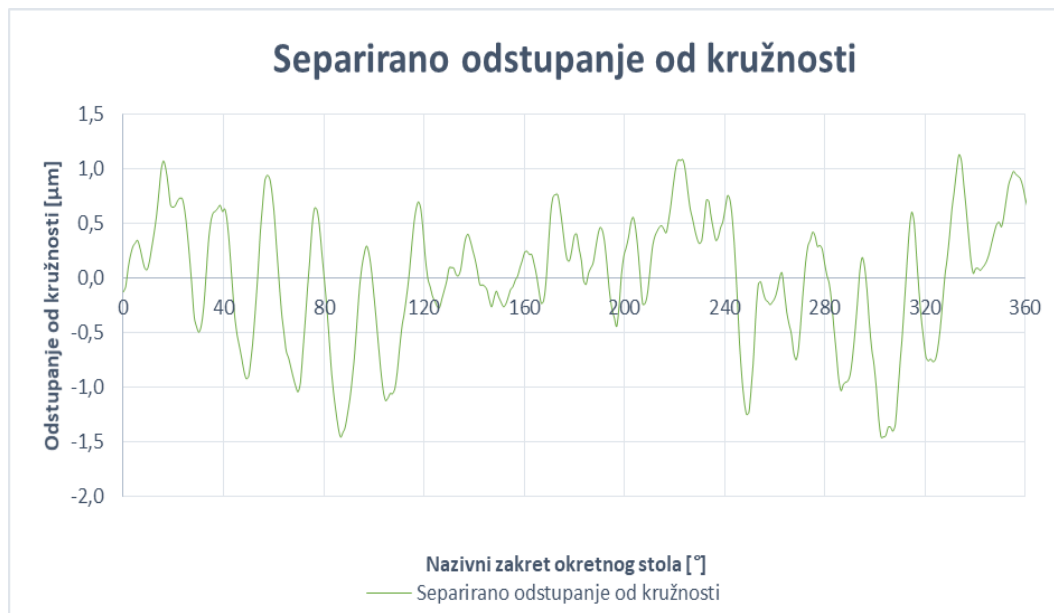
Za prosječne vrijednosti svih mjerenja početne orijentacije i reverzne orijentacije izračuna se separirana pogreška rotacije i separirano odstupanje od kružnosti.

Raspon pogreške rotacije iznosi od -1,7 µm do 2,2 µm što znači da pogreška rotacije reverzibilnom metodom separacije pogreške na Mahr-ovom MMQ3 uređaju iznosi 3,9 µm, slika 88. Može se primijetiti sinusni oblik odstupanja od kružnosti koji se može pripisati odstupanju kod centriranja predmeta mjerenja.



**Slika 88 Separirana pogreška rotacije**

Raspon separiranog odstupanja od kružnosti iznosi od  $-1,1 \mu\text{m}$  do  $1,4 \mu\text{m}$  što znači da separirano odstupanje od kružnosti reverzibilnom metodom separacije pogreške na Mahr-ovom MMQ3 uređaju iznosi  $2,6 \mu\text{m}$ , slika 89.



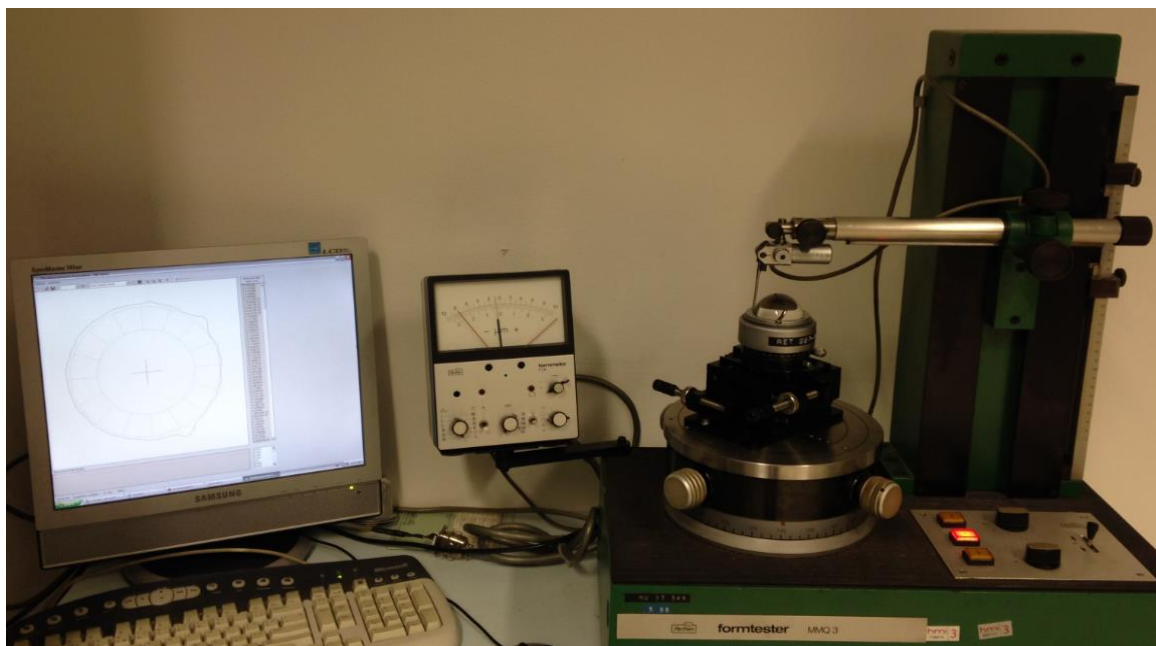
**Slika 89. Separirano odstupanje od kružnosti**

Sva mjerenja odstupanja od kružnosti imaju sinusni oblik što ukazuje da postoji odstupanje kod centriranja predmeta mjerenja ili da predmet mjerenja sadrži eliptično odstupanje od kružnosti. Sljedeći korak bi bio ustanoviti je li predmet mjerenja eliptičan i ako nije ukloniti nesusnost jednom od ranije navedenih metoda. U okviru ovog rada neće se raditi eliminacija nesusnosti već će se napraviti set mjerenja na etalonu za kružnost za koji znamo da je kružnog oblika.

### 5.8.2. Rezultati mjerenja odstupanja od kružnosti etalonske polukugle

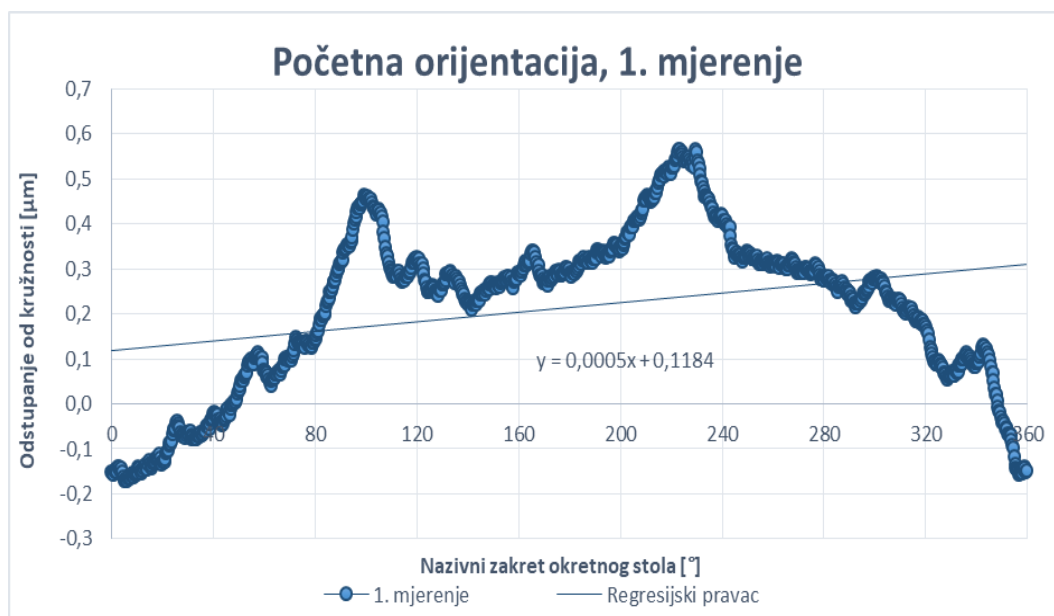
Mjerenje odstupanja od kružnosti etalonske polukugle RET 227-509 izvedeno je na Mahr-ovom MMQ3 uređaju. Prije početka mjerenja u računalnom programu postavljeno je mjerno područje na  $\pm 3 \mu\text{m}$ , a broj točaka mjerenja za 360 stupnjeva je 1024 točke.

Postupak postavljanja, centriranja, mjerenja i analize etalonske polukugle u potpunosti je jednak kao u prethodnom poglavlju pa se zbog toga neće ponovno objašnjavati. Sustav mjerenja odstupanja od kružnosti etalonske polukugle prikazan je na slici 90.



**Slika 90. Sustav mjerenja odstupanja od kružnosti etalonske polukugle.**

Na slici 91. prikazan je dijagram početne orijentacije, 1. mjerenja odstupanja od kružnosti te je označen regresijski pravac.



**Slika 91. Odstupanje od kružnosti - početna orijentacija, 1. mjerenje**

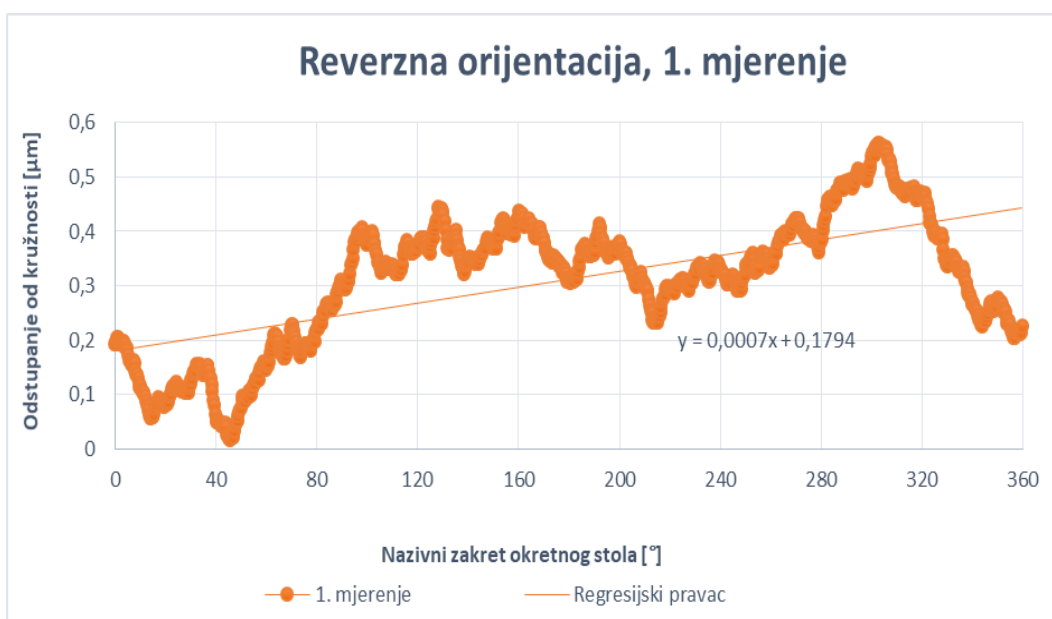
Slika 92. prikazuje dijagram prosječnih vrijednosti početne orijentacije dobivenih provedbom metode najmanjih kvadrata.





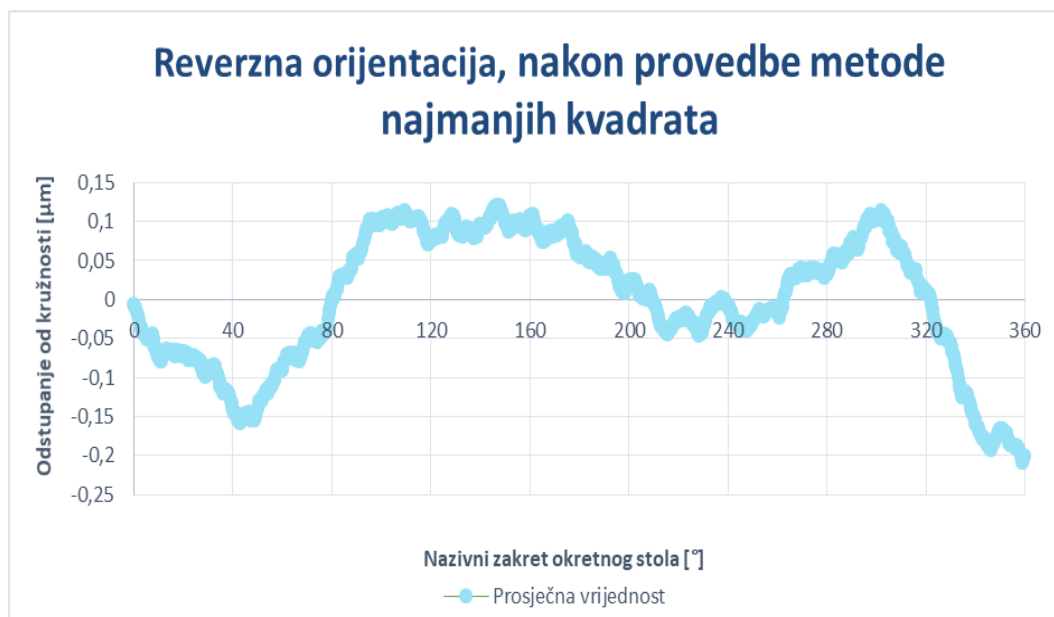
Slika 92. Odstupanje od kružnosti - početna orijentacija, prosječna vrijednost

Na slici 93. prikazan je dijagram reverzne orijentacije, 1. mjerenja odstupanja od kružnosti te je označen regresijski pravac.



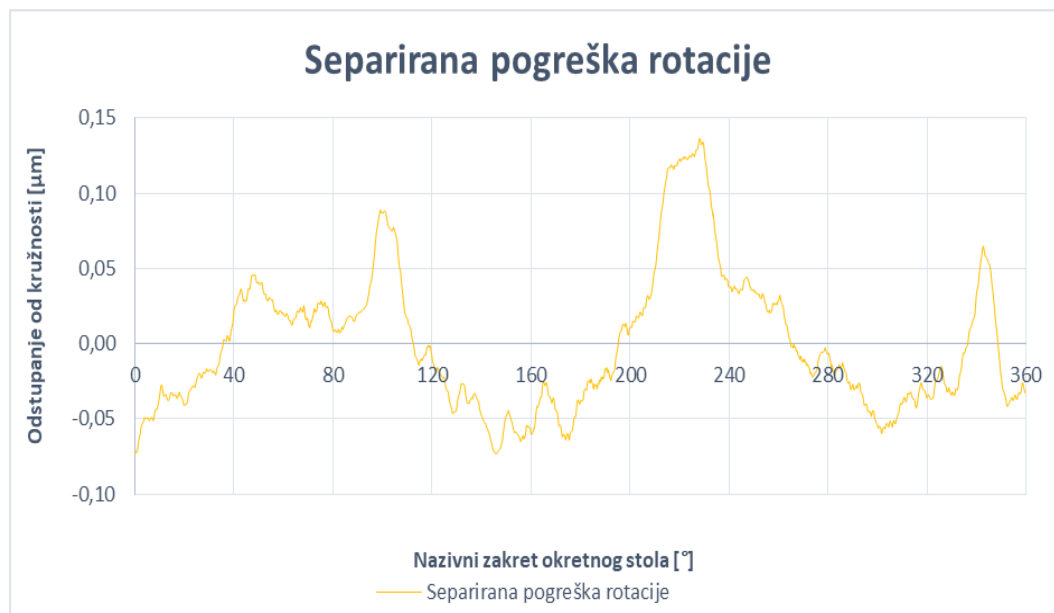
Slika 93. Odstupanje od kružnosti - reverzna orijentacija, 1. mjerenje

Slika 94. prikazuje dijagram prosječnih vrijednosti za reverznu orijentaciju dobivenih provedbom metode najmanjih kvadrata.



**Slika 94. Odstupanje od kružnosti - reverzna orijentacija, prosječna vrijednost**

Raspon pogreške rotacije iznosi od  $-0,074 \mu\text{m}$  do  $0,14 \mu\text{m}$  što znači da pogreška rotacije reverzibilnom metodom separacije pogreške na Mahr-ovom MMQ3 uređaju iznosi  $0,21 \mu\text{m}$ , slika 95. Sinusni oblik odstupanja od kružnosti prisutan je u mjerenju etalonske polukugle što je, s obzirom na poznato odstupanje etalona, moguće u potpunosti objasniti odstupanjima u centriranju predmeta mjerenja u odnosu na os vrtnje mjernog uređaja.



**Slika 95. Separirana pogreška rotacije**

Raspon pogreške odstupanja od kružnosti iznosi od  $-0,24 \mu\text{m}$  do  $0,19 \mu\text{m}$  što znači da odstupanje od kružnosti etalonske polukugle reverzibilnom metodom separacije pogreške na Mahr-ovom MMQ3 uređaju iznosi  $0,43 \mu\text{m}$ , slika 96.

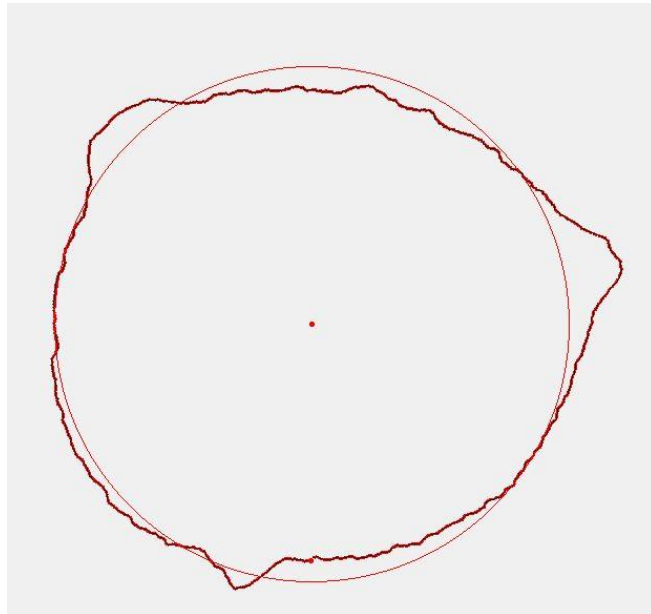


**Slika 96. Separirano odstupanje od kružnosti**

Može se zaključiti da je prisustvo nesuosnosti, koja unosi karakteristiku sinusnog oblika u rezultate mjerenja, osnovni problem kod primjene ove metode na mjerenje odstupanja od kružnosti. Također, to je i osnovna razlika u odnosu na linearno mjerenje odstupanja od pravocrtosti, budući da kod linearnih mjerenja promjena nagiba predmeta mjerenja ne utječe na izgled izmjenjenog profila.

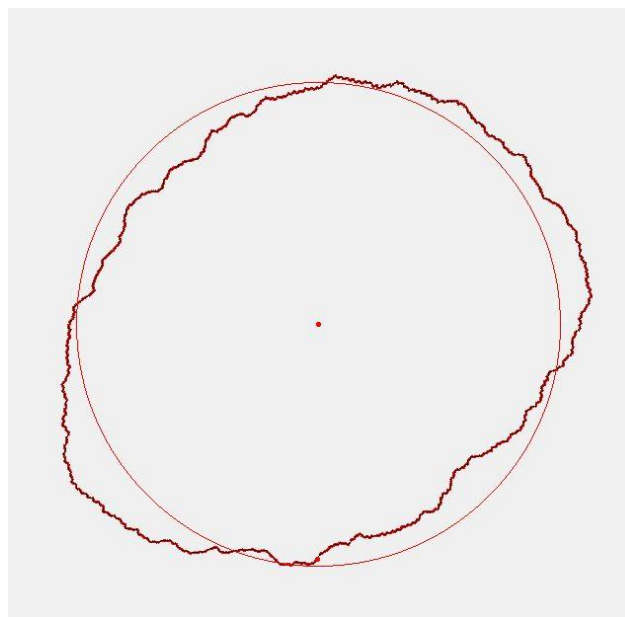
Idući korak bi bio eliminacija nesuosnosti jednom od prethodno navedenih metoda, što se neće prikazati u ovom radu. Prema tome može se zaključiti da je, ukoliko se ne provodi korekcija ekscentričnosti, točnost reverzibilne metode separacije pogreške mjerenja odstupanja od kružnosti ograničena točnošću centriranja mjernog predmeta.

Napravljena je usporedba obrade istih mjerenja etalonske hemisfere metodom pravca kao funkcije koja se optimira metodom najmanjih kvadrata s metodom kružnice kao funkcije koja se optimira metodom najmanjih kvadrata. Metoda kružnice najmanjih kvadrata izlazi van okvira ovog diplomskog rada pa će se prikazati samo krajnji rezultati obrade mjerenja etalonske hemisfere ovom metodom. Na slici 97. prikazan je polarni graf početne orijentacije, 1. mjerenja odstupanja od kružnosti.



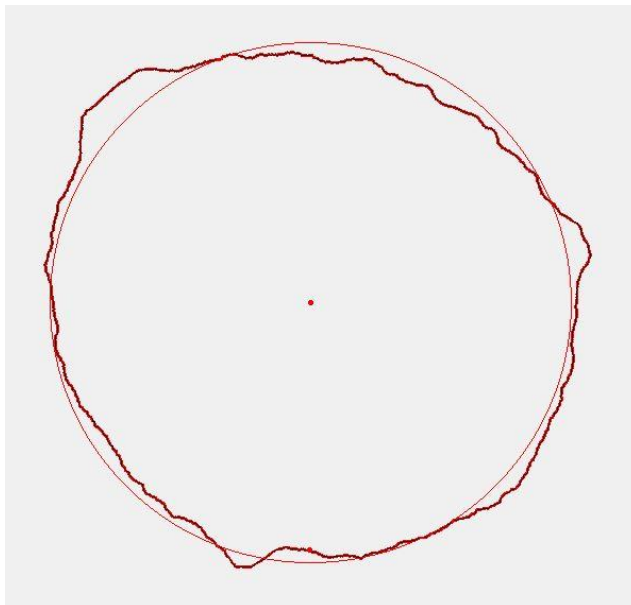
**Slika 97. Odstupanje od kružnosti - početna orijentacija, 1. mjerenje**

Na slici 98. prikazan je polarni graf reverzne orijentacije, 1. mjerenja odstupanja od kružnosti.



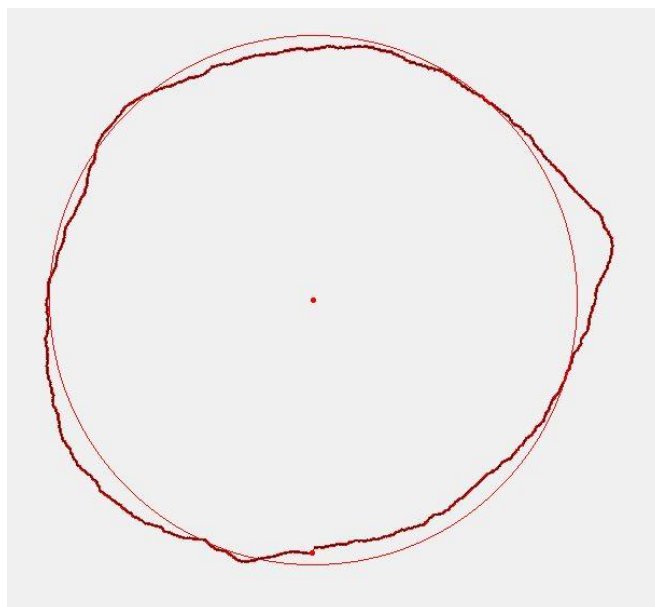
**Slika 98. Odstupanje od kružnosti - reverzna orijentacija, 1. mjerenje**

Slika 99. prikazuje separiranu pogrešku rotacije Mahr MMQ3 uređaja dobivenu reverzibilnom metodom separacije pogreške, iznosa  $0,21 \mu\text{m}$ .



**Slika 99. Separirano pogreška rotacije**

Odstupanje od kružnosti etalonske polukugle, izračunato reverzibilnom metodom separacije pogreške i primjenom kružnice kao funkcije koja se optimira metodom najmanjih kvadrata, iznosi  $0,29 \mu\text{m}$  (slika 100).



**Slika 100. Separirano odstupanje od kružnosti**

Zaključak je da se korištenjem linearne regresije mogu dobiti slični rezultati kao primjenom kružnice kao funkcije koja se optimira metodom najmanjih kvadrata, što je zadovoljavajuće ako se radi o mjerenjima niže razine točnosti.

## 6. ZAKLJUČAK

U prvom dijelu diplomskog rada navedeni su i opisani osnovni pojmovi mjeriteljstva. Tema diplomskog rada je separacija pogreške vođenja, stoga su navedene i ukratko pojašnjene sve najvažnije metode mjerenja odstupanja od pravocrtnosti s naglaskom na reverzibilnu metodu separacije pogreške. Primjenjivost reverzibilne metode separacije pogreške prikazana je s nekoliko mjerenja među kojima prvo mjerenje predstavlja ispitivanje stabilnosti induktivnog ticala na fleksibilnom magnetnom držaču i ispitivanje stabilnost induktivnog ticala na krutom držaču uz predodčen utjecaj temperature. U ostalim mjerenjima reverzibilnom metodom separacije pogreške izračunato je odstupanje od pravocrtnosti mjernog predmeta i odstupanje od pravocrtnosti vodilice različitim mjernim metodama: fleksibilni magnetni držač, kruti držač, kruti držač s laserskim pozicioniranjem, trokordinatni mjerni uređaj, alatni mikroskop i mjerenje odstupanja od kružnosti na Mahr MMQ3 mjernom uređaju.

Prvim mjerenjem ustanovljeno je da postoji promjena temperature uzrokovana promjenom pozicije mjeritelja, ali ako mjerimo red veličine mikrometar pogreška je zanemariva ili ima jako mali utjecaj na stabilnost ticala. Osim mjerenja alatnim mikroskopom i mjerenja kružnosti u svim ostalim mjerenjima mjereno je odstupanje od pravocrtnosti granitnog lineala. Iz rezultata mjerenja može se zaključiti da je fleksibilni magnetni držač nestabilan u odnosu na kruti držač. Iznos odstupanja od pravocrtnosti granitnog lineala nije se promjenio korištenjem točnijeg sustava pozicioniranja krutog držača uz pomoć laserskog interferometra, može se reći da je pozicija rezultata mjerenja vjerodostojnija s obzirom na nazivni pomak, ali iznos odstupanja je isti. Usporedbom odstupanja od pravocrtnosti granitnog lineala na trokordinatnom mjernom uređaju s rezultatima krutog držača s laserskim pozicioniranjem vidljiva je razlika rezultata. Međutim jedan od razloga niže pogreške pravocrtnosti trokordinatnog mjernog uređaj je automatski režim mjerenja gdje se eliminira utjecaj mjeritelja. Iz rezultata usporedbe mjerenja trokordinatnim mjernim uređajem s mjerenjima krutog držača s laserskim pozicioniranjem slijedi zaključak da kruti nosač nije dobar izbor za mjerenje granitnog lineala s vrlo malim odstupanjem od pravocrtnosti ( $< 10 \mu\text{m}$ ) kao u slučaju ovog diplomskog rada. Mjerenjima na alatnom mikroskopu i na Mahr MMQ3 dokazana je primjenjivost reverzibilne metode separacije pogreške na različitim kontaktnim i beskontaktnim mjernim metodama.

U ovom radu obrađena je tema reverzibilne metode separacije pogreške teorijskim opisom i praktičnim mjerenjima prema kojim se zaključuje da reverzibilna metoda separacije pogreške potpuno primjenjiva na različite kontaktne i beskontaktne mjerne metode.

## LITERATURA

- [1] Preben Howarth, Fiona Redgrave; prijevod Mladen Molnar: Mjeriteljstvo ukratko 3. izdanje, Zagreb: Državni zavod za mjeriteljstvo, 2015, str 10.
- [2] Biserka Runje: Predavanja iz kolegija „Mjeriteljstvo“, Zagreb, 2013.
- [3] [https://en.wikipedia.org/wiki/History\\_of\\_measurement](https://en.wikipedia.org/wiki/History_of_measurement), 15.01.2019.
- [4] Đorđe Šilić: Mjerenja, Velika gorica, 2016.
- [5] Biserka Runje: Predavanja iz kolegija „Teorija i tehnika mjerenja“, Zagreb, 2014.
- [6] Biserka Runje: Predavanja „Mjerenje oblika i dimenzija“, Zagreb.
- [7] IS 12937: Engineering metrology- Methods of testing straightness, flatness and perpendicularity, 1990.
- [8] <https://www.mahr.com/mahr-parameter/html/english/MarForm/straightness.html>  
15.01.2019
- [9] <http://www.engineeringessentials.com/gdt/circularity/circularity.htm> 20.1.2019
- [10] <https://www.mahr.com/mahr-parameter/html/english/MarForm/roundness.html>  
20.01.2019  
ABC M Symposium Series in Mechatronics-Vol. 1 – pp.479-487
- [11] E.R.Marsh PA, D.A.Arneson MN, D.L.Martin MN, „A comparison of reversal and multiprobe error separation“ 28.February.2008
- [12] B. Di Giacomo, R. De Cassia Alves de Magalhes, F.T. Paziani „Reversal technique applied to the measurement of straightness errors“, 2004 by ABCM
- [13] <https://zir.nsk.hr/islandora/object/fizos:19/preview> 30.01.2019
- [14] [https://hr.wikipedia.org/wiki/Standardna\\_devijacija](https://hr.wikipedia.org/wiki/Standardna_devijacija) 05.02.2019
- [15] [https://www.biologyforlife.com/uploads/2/2/3/9/22392738/sd2\\_orig.png](https://www.biologyforlife.com/uploads/2/2/3/9/22392738/sd2_orig.png) 05.02.2019
- [16] Mladen Popović, „Senzori i mjerenja“, 2004
- [17] [https://en.wikipedia.org/wiki/Linear\\_variable\\_differential\\_transformer](https://en.wikipedia.org/wiki/Linear_variable_differential_transformer) 07.02.2019
- [18] <https://www.te.com/usa-en/industries/sensor-solutions/insights/lvdt-tutorial.html>  
07.02.2019
- [19] [https://en.wikipedia.org/wiki/Coordinate-measuring\\_machine](https://en.wikipedia.org/wiki/Coordinate-measuring_machine) 12.02.2019
- [20] <https://www.novacam.com/products/coordinate-measuring-machine/> 12.02.2019
- [21] <http://www.ignou.ac.in/upload/Unit-8-62.pdf> 14.02.2019
- [22] <http://slideplayer.com/slide/7087576/> 14.02.2019



- [23] <https://www.wenzelamerica.com/wp-content/uploads/2017/04/used-CMM-6B.jpg>  
14.02.2019
- [24] <http://www.omnicmm.com/wp-content/uploads/2016/05/probe-service-provider.jpg>  
14.2.2019
- [25] <https://www.renishaw.com/en/interferometry-explained--7854> 01.03.2019
- [26] <https://en.wikipedia.org/wiki/Interferometry> 01.03.2019
- [27] <http://www.micro-radian.com/Principles.html> 01.03.2019
- [28] <http://www.mechscience.com/autocollimator-construction-and-working-principle-of-autocollimator-angular-measurements/> 02.03.2019
- [29] [https://www.holmarc.com/tool\\_makers\\_microscope.php](https://www.holmarc.com/tool_makers_microscope.php) 04.03.2019
- [30] Zaimović-Uzunović, Lemeš, Denjo, Softić: Proizvodna mjerenja, Zenica, 2009.,  
05.03.2019
- [31] <https://www.fsb.unizg.hr/zzk/lfsb/razvoj.html> 07.3.2019

## **PRILOZI**

### **I. CD-R disc**